

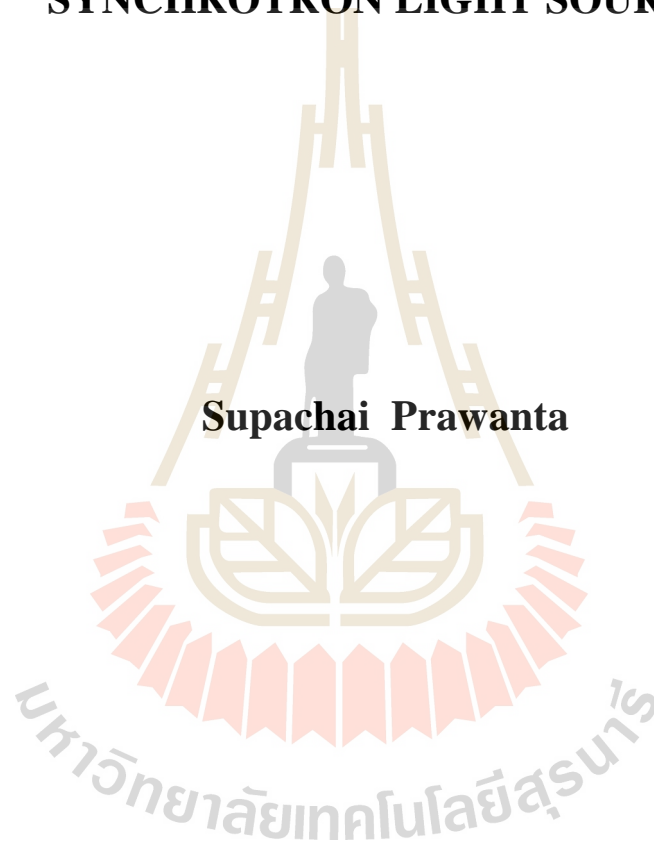
การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของแท่นรองรับแม่เหล็กที่
เคลื่อนไหว 3 องศาอิสระ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**AUTOMATIC CONTROL SYSTEM DESIGN AND
IMPLEMENTATION OF MAGNET GIRDER
WITH 3 DOF MOTION FOR THE
SYNCHROTRON LIGHT SOURCE**

Supachai Prawanta



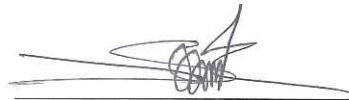
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2017

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของแท่นรองรับแม่เหล็กที่เคลื่อนไหว
3 องศาอิสระ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุุณบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีรุ่งผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.กิริติ สุตักษณ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.การุณ พังสุวรรณรักษ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภชัย ประวันตา : การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของแท่นรองรับแม่เหล็ก
ที่เคลื่อนไหว 3 องศาอิสระ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน (AUTOMATIC

CONTROL SYSTEM DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MAGNET GIRDER
WITH 3 DOF MOTION FOR THE SYNCHROTRON LIGHT SOURCE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 188 หน้า.

ปัญหาการหลุดและเลื่อนตัวของพื้นอาคารปฏิบัติการที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน
ส่งผลให้การผลิตแสงซินโครตรอนเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ การปรับตั้งแม่เหล็กและ
ท่อลำเลียงอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ต้องใช้บุคลากร
ที่มีประสบการณ์และความชำนาญจำนวนมาก และใช้เวลานานหลายเดือน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ
การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของแท่นรองรับแม่เหล็กที่เคลื่อนไหวได้
3 องศาอิสระ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับ
และตำแหน่งที่ถูกต้องได้ โดยออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วย
ลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลางขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนไหว ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y
ระยะการเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x มุมการหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และ
การหมุนรอบแนวแกน z มุมการหมุน ± 30 มิลลิเรเดียน ประเมินแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับ
ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กและระบบขับเคลื่อนที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น คำนวณมุมการหมุนของ
ระบบขับเคลื่อนด้วยสมการจลนศาสตร์ผกผัน ควบคุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุม
แบบพีไอเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ
การวิเคราะห์และผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถทำให้ตัวแท่น
รองรับแม่เหล็กเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง
และแบบคงค่าเอาต์พุต การเคลื่อนไหวมมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ สามารถนำไป
ประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน
ให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา



ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



SUPACHAI PRAWANTA : AUTOMATIC CONTROL SYSTEM DESIGN
AND IMPLEMENTATION OF MAGNET GIRDER WITH 3 DOF MOTION
FOR THE SYNCHROTRON LIGHT SOURCE. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 188 PP.

AUTOMATIC CONTROL/ MAGNET GIRDER/ ECCENTRIC CIRCLE CAM/
REFERENCE TRAJECTORY TRACKING/ OUTPUT REGULATION

Floor subsidence of the building at the Synchrotron Light Research Institute has resulted in inefficient synchrotron light production. Realignment of magnets and electron transport ducts of the storage ring to correct the level and position requires a lot of experienced, skilled manpower and the realignment takes several months. This research presents an automatic control system design and the implementation of magnet girder with three degrees of freedom motion for magnets and electron transport ducts adjustment. The magnet girder system uses the eccentric circle cam actuator system to drive the motion, which includes the translation along y-axis within ± 6 mm range, the rotation around x-axis within ± 20 mrad range and the rotation around z-axis within ± 30 mrad range. Linear mathematical models are applied to estimate the non-linear properties of the magnet girder and actuator systems. Rotation angle of the actuator system is calculated using an inverse kinematics equation. The rotations which were controlled by the PI controller and the feedback controller with full-order state observer were compared. The experimental results and analysis show that the automatic control system can move and rotate the magnet girder to the specified coordinates in three degrees of freedom, both with the reference trajectory

tracking and with the output regulation. The motion is efficient and accurate as required. Therefore, the automatically controlled magnet girder system developed in this research can be used to adjust the level and position of magnets and electron transport ducts of the synchrotron light source accurately.


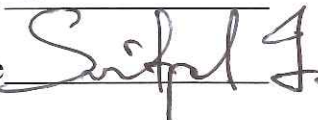


School of Mechanical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำ รวมทั้งการช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำการแก้ไขปัญหา และให้ความเมตตาปราณีต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี รวมทั้งช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตให้กับผู้วิจัย

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุธ สุจิตจร ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านระบบควบคุม ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัย มีความเมตตาปราณีต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

บุคลากรที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดสร้างชิ้นงานและบัณฑิตศึกษากลุ่มปฏิบัติการด้านระบบควบคุม ที่ให้การช่วยเหลือในงานวิจัยด้วยดีมาโดยตลอด

ทุนรัฐบาลที่จัดสรรให้กระทรวงวิทยาศาสตร์ ฯ เพื่อศึกษาวิชาในประเทศ ประจำปี พ.ศ. 2556 ตามความต้องการของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ไปศึกษาในสาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ เน้น ระบบควบคุมและอัตโนมัติ ระดับปริญญาเอก

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณ คุณพรณทิพา ประวันตา ที่คอยเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

ศุภชัย ประวันตา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	11
1.3 ขอบเขตทางวิศวกรรม.....	11
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	11
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	12
2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 บทนำ.....	14
2.2 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก.....	14
2.2.1 เทคนิคการปรับตั้งด้วยสลักเกลียวและน็อต.....	14
2.2.2 เทคนิคการปรับตั้งด้วยแม่แรงลิ้ม.....	16
2.2.3 เทคนิคการปรับตั้งด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง.....	18
2.3 ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม	21
2.3.1 การควบคุมแบบวงปิด	21
2.3.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	ระบบควบคุมสมัยใหม่.....	25
2.4.1	แบบจำลองปริภูมิสถานะและฟังก์ชันถ่ายโอน	25
2.4.2	สภาพควบคุมได้และสภาพสังเกตได้.....	29
2.4.3	การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล	30
2.4.4	การออกแบบตัวสังเกตสถานะ	32
2.5	การทำให้เป็นเชิงเส้น	36
2.6	ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว.....	38
2.7	เสถียรภาพของระบบ	43
2.7.1	เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกถูกจำกัดขอบเขต.....	43
2.7.2	เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์.....	45
2.8	สรุป.....	45
3	การออกแบบและสร้างระบบแทนรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ	47
3.1	บทนำ.....	47
3.2	การออกแบบระบบแทนรองรับแม่เหล็ก.....	47
3.2.1	มิติและขนาดของตัวโครงสร้าง	47
3.2.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
3.2.3	สมการจลนศาสตร์ผกผัน	57
3.3	การออกแบบระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลาง.....	63
3.3.1	มิติและขนาดของตัวโครงสร้าง	63
3.3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	64
3.4	การจัดสร้างระบบแทนรองรับแม่เหล็ก.....	69
3.4.1	การจัดสร้างชิ้นงาน	69
3.4.2	การประกอบติดตั้ง.....	70
3.4.3	การทดสอบระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเคลื่อน.....	72
3.4.4	การทดสอบการเคลื่อนไหวยของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก.....	75
3.5	สรุป.....	77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหวมอเตอร์อัตโนมัติ	78
4.1	บทนำ	78
4.2	การออกแบบตัวควบคุมของระบบขับเคลื่อน	78
4.2.1	การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์	78
4.2.2	การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	81
4.2.3	การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบ ป้อนกลับสถานะ	88
4.2.4	ตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	98
4.2.5	การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ	106
4.3	การออกแบบตัวควบคุมของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก	109
4.3.1	การควบคุมระบบแท่นรองรับแม่เหล็กด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล	109
4.3.2	การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ	111
4.3.3	การควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง	115
4.3.4	การควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนแบบคงค่าเอาต์พุต	124
4.3.5	การตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้	129
4.4	สรุป	137
5	การทดสอบการเคลื่อนไหวมอเตอร์อัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก	138
5.1	บทนำ	138
5.2	การติดตั้งอุปกรณ์ระบบควบคุม	138
5.2.1	การต่อประสานอุปกรณ์ระบบควบคุม	138
5.2.2	การเขียนโปรแกรมควบคุมด้วย MATLAB/Simulink	139
5.3	การทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยวกลแบบเชิงศูนย์กลาง	142
5.3.1	การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	142
5.3.2	การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับ สถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	145

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4	การทดสอบการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก	154
5.4.1	การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง	154
5.4.2	การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต	161
5.5	สรุป	169
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	170
6.1	บทสรุป	170
6.2	ข้อเสนอแนะ	172
	รายการอ้างอิง	174
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมคำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 โปรแกรมคำนวณ Heave, Pitch และ Roll ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก	178
	ภาคผนวก ข. อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการประกอบติดตั้ง	182
	ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	186
	ประวัติผู้เขียน	188

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงรายละเอียดมิติและขนาดของตัวโครงสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก.....	50
5.1 ผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟีดไอ.....	145



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	แผนภาพของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน	1
1.2	เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง	2
1.3	ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ	3
1.4	เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม	3
1.5	ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง	4
1.6	วงกักเก็บอิเล็กตรอน	5
1.7	แผนภาพการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ DBA ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน	5
1.8	กราฟแสดงแนวระนาบของแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอนในปี พ.ศ. 2545	7
1.9	กราฟแสดงแนวระนาบของแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอนในปี พ.ศ. 2546 ปี พ.ศ. 2549 และปี พ.ศ. 2555	7
1.10	การติดตั้งแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน	8
1.11	การติดตั้งท่อลำเลียงอิเล็กตรอนเข้ากับชุดแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอน	8
1.12	แผนภาพการจัดวางระบบแท่นรองรับแม่เหล็กใหม่ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน	9
2.1	ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ Spring-8 ประเทศญี่ปุ่น	15
2.2	ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ NSLS-II ประเทศสหรัฐอเมริกา	16
2.3	ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ APS ประเทศสหรัฐอเมริกา	17
2.4	ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ ESRF ประเทศฝรั่งเศส	17
2.5	ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ SLS ประเทศสวิตเซอร์แลนด์	18
2.6	ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ PETRA III ประเทศเยอรมัน	19
2.7	แผนภาพบล็อกโครงสร้างของระบบควบคุมแบบวงปิด	21
2.8	แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบวงปิด	22
2.9	แผนภาพบล็อกโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอดี	24
2.10	แผนภาพบล็อกระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา	25
2.11	แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะ แบบเต็มอันดับ.....	34
2.13 แผนภาพการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา	37
2.14 แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	38
2.15 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีการรบกวนเข้ามาในระบบ.....	42
3.1 การออกแบบระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ	48
3.2 แบบแสดงรายละเอียดมิติและขนาดของ โครงสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก	49
3.3 ระบบแกนอ้างอิงที่ใช้อธิบายการเคลื่อนไหวของแท่นรองรับแม่เหล็ก	51
3.4 แผนภาพเค้าร่างตัวขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางและตัวแท่นรองรับ.....	53
3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) กับ ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3.....	59
3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) กับ ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3.....	60
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) กับ ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3.....	60
3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1.....	61
3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 2.....	62
3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 3.....	62
3.11 การออกแบบระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง	64
3.12 แผนภาพเค้าร่างระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง	65
3.13 แผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อนแบบวงเปิด	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 การสร้างชิ้นงานของระบบขับเรือด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง	69
3.15 ระบบขับเรือด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง	70
3.16 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ	71
3.17 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ	72
3.18 แผนภาพระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่สัมพันธ์กับมุมการหมุนการลูกเบี้ยววงกลม	73
3.19 การทดสอบระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	73
3.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ ระยะเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเรือที่ 1	74
3.21 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ ระยะเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเรือที่ 2	74
3.22 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ ระยะเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเรือที่ 3	75
3.23 กราฟเปรียบเทียบผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	76
3.24 กราฟเปรียบเทียบผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	76
3.25 กราฟเปรียบเทียบผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	77
4.1 กราฟทดสอบแรงดันไฟฟ้าอินพุตและความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตระบบขับเรือ	79
4.2 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานและความเหนียวน้ำ	80
4.3 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบขับเรือ ด้วยวิธีการ Parameter Estimation ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	80
4.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบกับการประมาณค่า ใช้วิธีการ Parameter Estimation ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	81
4.5 แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	แผนภาพบล็อกการหาค่าเหมาะที่สุดของอัตราขยายฟีด ด้วยโปรแกรม ด้วยวิธีการ Response Optimization ในโปรแกรม MATLAB/Simulink84
4.7	แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ใช้ตัวควบคุมฟีด ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.....84
4.8	กราฟผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนแรงดันอาร์มาเจอร์และ กระแสอาร์มาเจอร์ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบฟีด.....85
4.9	กราฟผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนแรงดันอาร์มาเจอร์และ กระแสอาร์มาเจอร์ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบฟีด.....86
4.10	กราฟผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนแรงดันอาร์มาเจอร์และ กระแสอาร์มาเจอร์ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบฟีด.....87
4.11	แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน ด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ89
4.12	แผนภาพการวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบขับเคลื่อน92
4.13	แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน และตัวแปรสถานะ ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink93
4.14	กราฟผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ94
4.15	กราฟผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ95
4.16	กราฟผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ96
4.17	กราฟผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดแฉววิถีของอินพุตอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ.....97
4.18	แผนภาพบล็อกการออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แผนภาพบล็อกการควบคุมแหล่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือ.....	103
4.20 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน และตัวแปรสถานะ ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	104
4.21 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือ และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	105
4.22 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ	110
4.23 แผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก.....	111
4.24 แผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง และการประวิงเวลาของระบบขับเรือ	112
4.25 แผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง และการประวิงเวลาของระบบ	113
4.26 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบ ตามรอยแนววิถีอ้างอิงของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	116
4.27 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง +6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	118
4.28 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง -6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	119
4.29 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	121
4.31 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	122
4.32 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	123
4.33 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	124
4.34 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดการรบกวนจากภายนอก D_y มีค่าเท่ากับ ± 6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	126
4.35 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดการรบกวนจากภายนอก D_θ มีค่าเท่ากับ ± 20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	127
4.36 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดการรบกวนจากภายนอก D_ϕ มีค่าเท่ากับ ± 30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	128
4.37 แผนภาพบล็อกการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave, Pitch และ Roll	129
4.38 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave, Pitch และ Roll ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	131
4.39 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll กำหนดอินพุตอ้างอิง Heave ไว้ที่ +4 มิลลิเมตร และที่เวลา 30 วินาที เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave ขึ้น ขนาด +1 มิลลิเมตร	133

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.40	กราฟผลตอบแทนของการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll กำหนดอินพุตอ้างอิง Pitch ไร่ที่ +15 มิลลิเรเดียน และที่เวลา 30 วินาที เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Pitch ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน	134
4.41	กราฟผลตอบแทนของการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll กำหนดอินพุตอ้างอิง Roll ไร่ที่ +20 มิลลิเรเดียน และที่เวลา 30 วินาที เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Roll ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน	135
4.42	กราฟผลตอบแทนของการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll กำหนดอินพุตอ้างอิง Heave ไร่ที่ +4 มิลลิเมตร และที่เวลา 30 วินาที เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave ขึ้น ขนาด +1 มิลลิเมตร เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Pitch ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน และ เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Roll ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน	136
5.1	แผนภาพบล็อกการต่อประสานอุปกรณ์ระบบควบคุม	139
5.2	บอร์ดควบคุมด้วยแพลตฟอร์ม RAPCON	140
5.3	โปรแกรมการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink	141
5.4	โปรแกรมการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบ ป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink	141
5.5	โปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ให้อัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink	142
5.6	กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	143
5.7	กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	143
5.8	กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	144

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	146
5.10 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	147
5.11 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	148
5.12 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 2 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	149
5.13 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 3 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	150
5.14 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1 และตัวแปรสถานะ กำหนดแนววิถีอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	151
5.15 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 2 และตัวแปรสถานะ กำหนดแนววิถีอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	152
5.16 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 3 และตัวแปรสถานะ กำหนดแนววิถีอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ	153
5.17 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง +6 มิลลิเมตร	155

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) และผลตอบสนองตำแหน่ง เชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิง อยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง -6 มิลลิเมตร	156
5.19 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และผลตอบสนองตำแหน่ง เชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิง อยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +20 มิลลิเรเดียน	157
5.20 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และผลตอบสนองตำแหน่ง เชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิง อยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -20 มิลลิเรเดียน	158
5.21 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) และผลตอบสนองตำแหน่ง เชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิง อยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +30 มิลลิเรเดียน	159
5.22 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) และผลตอบสนองตำแหน่ง เชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิง อยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -30 มิลลิเรเดียน	160
5.23 กราฟการรับกวนจากภายนอกที่ได้จากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1	161
5.24 กราฟการรับกวนจากภายนอกที่ได้จากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 2	162
5.25 กราฟการรับกวนจากภายนอกที่ได้จากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 3	162
5.26 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าแอดพัท เมื่อมีการรับกวนจากภายนอก ที่ได้จากตัวปรับระดับที่ 1 และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	163
5.27 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าแอดพัท เมื่อมีการรับกวนจากภายนอก ที่ได้จากตัวปรับระดับที่ 2 และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	164
5.28 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าแอดพัท เมื่อมีการรับกวนจากภายนอก ที่ได้จากตัวปรับระดับที่ 3 และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3	165

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.29	กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต กำหนดให้การเคลื่อนที่ ในแนวแกน $y + 4$ มิลลิเมตร สร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้ง ตัวปรับระดับที่ 1 และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3.....	166
5.30	กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต กำหนดให้การเคลื่อนที่ ในแนวแกน $y + 4$ มิลลิเมตร สร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้ง ตัวปรับระดับที่ 2 และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3.....	167
5.31	กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต กำหนดให้การเคลื่อนที่ ในแนวแกน $y + 4$ มิลลิเมตร สร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้ง ตัวปรับระดับที่ 3 และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3.....	168
ข.1	ตัวตรวจรู้มุมการหมุนรอบแนวแกน x และมุมการหมุนรอบแนวแกน z	183
ข.2	ตัวตรวจรู้การเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave).....	184
ข.3	ตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน.....	184
ข.4	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรและชุดเฟืองตัวหนอน	185

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	เมทริกซ์ของระบบขับเคลื่อน
A	=	จุดหมุนของแกนเพลาถูกเบี่ยงวงกลม
α	=	ตำแหน่งเชิงมุมหมุนของระบบขับเคลื่อน
α_d, α_L	=	ตำแหน่งเชิงมุมหมุน อินพุต-เอาต์พุต ของระบบขับเคลื่อน
α_m	=	ตำแหน่งเชิงมุมหมุนของมอเตอร์
B	=	เมทริกซ์อินพุตของระบบขับเคลื่อน
B	=	จุดศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลม
BIBO	=	เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าสัญญาณออกถูกจำกัดขอบเขต
BM	=	แม่เหล็กบังคับลิ้นไขว้
b	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด
b_{3eq}	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดรวมของระบบขับเคลื่อน
β	=	มุมจุดสัมผัสระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับตัวแทนรองรับแม่เหล็ก
C	=	เมทริกซ์เอาต์พุตของระบบขับเคลื่อน
C	=	จุดสัมผัสระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับตัวแทนรองรับแม่เหล็ก
\bar{c}	=	ผลรวมของเวกเตอร์จากจุดอ้างอิง O ถึงจุด C
ζ	=	ค่าอัตราส่วนการหน่วง
D	=	เมทริกซ์การส่งผ่าน
D_v, D_θ, D_ϕ	=	การรบกวนจากภายนอกเข้ามาที่ Heave, Pitch และ Roll
e	=	ค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์สถานะ
e	=	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลมกับจุดแกนเพลาหมุน
e_b	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
ϕ	=	มุมหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก
ϕ_d, ϕ_L	=	มุมหมุน อินพุต-เอาต์พุต รอบแนวแกน z ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก
ψ	=	มุมหมุนรอบแนวแกน y ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก
GeV	=	หน่วยจิกะอิเล็กตรอนโวลต์
$G_A(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขับเคลื่อนในรูป s โดเมน
$G_C(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมในรูป s โดเมน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

g	=	แรงโน้มถ่วง
H	=	หน่วยเฮนรี
$H(s)$	=	ตัวตรวจรู้เอาต์พุตของระบบในรูป s โดเมน
Γ^{-1}	=	สมการจลนศาสตร์ผกผันของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก
i_a	=	กระแสไฟฟ้าอาร์มาเจอร์
\int	=	ปริพันธ์
J	=	โมเมนต์ความเฉื่อย
J_{3eq}	=	โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบขับเคลื่อน
\mathbf{K}	=	เมทริกซ์อัตราขยายการป้อนกลับสถานะ
K_b	=	สัมประสิทธิ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
K_P, K_I, K_D	=	อัตราขยายสัดส่วน อัตราขยายปริพันธ์ อัตราขยายอนุพันธ์
K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}	=	อัตราขยายอินทิกรัล 1, 2 และ 3
K_t	=	สัมประสิทธิ์แรงบิดมอเตอร์
k_1, k_2, k_3	=	อัตราขยายป้อนกลับสถานะ 1, 2 และ 3
K_v, K_θ, K_ϕ	=	อัตราขยายของตัวตรวจรู้ Heave, Pitch และ Roll
Γ	=	สมการจลนศาสตร์ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก
\mathbf{L}	=	เมทริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต
LTI	=	ระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา
L_a	=	ความเหนี่ยวนำขดลวดอาร์มาเจอร์
l_1, l_2, l_3	=	อัตราขยายของตัวสังเกต 1, 2 และ 3
$lhs.$	=	ฝั่งซ้ายของสมการ
\mathbf{M}	=	เมทริกซ์สภาพควบคุมได้
MHz	=	เมกะเฮิรตซ์
MIMO	=	ระบบที่มีหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต
MPW	=	แม่เหล็กมัลติโพลวิก์เลอร์
m	=	มวลลูกตุ้มนาฬิกา
\vec{m}	=	เวกเตอร์จากจุดอ้างอิง O ไปยังจุด A
m_x, m_y, m_z	=	ขนาดพิกัดตำแหน่งจุดหมุนของแกนเพลาลูกเบี้ยว

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

mrad	=	หน่วยมิลลิเรเดียน
N	=	เมทริกซ์สภาพสังเกตได้
\vec{n}	=	เวกเตอร์ตั้งฉาก
nm-rad	=	นาโนเมตร-เรเดียน
N_t	=	อัตราทดเฟืองรวม
O	=	จุดอ้างอิงบนตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก
ω_L	=	ความเร็วเชิงมุมของระบบขับเร้า
ω_m	=	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง
Ω	=	โอห์ม
PI	=	ตัวควบคุมพีไอ
PID	=	ตัวควบคุมพีไอดี
R	=	เมทริกซ์การหมุนรอบแนวแกนทั้งสาม
R_a	=	ความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์
R_{linear}	=	เมทริกซ์การหมุนแบบเชิงเส้น
$R(s)$	=	สัญญาณอินพุตอ้างอิงในรูป s โดเมน
R_x, R_y, R_z	=	เมทริกซ์การหมุนรอบแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z
r	=	รัศมีของลูกเบี้ยววงกลม
$rhs.$	=	ฝั่งขวาของสมการ
SISO	=	ระบบที่มีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว
SWLS	=	แม่เหล็กชุดเปอร์คอนดักตึงเวปเล็งชีพเตอร์
\vec{s}	=	ผลรวมของเวกเตอร์จากจุดอ้างอิง O ถึงจุด C ในอุดมคติ
S_p	=	ค่าการชักตัวอย่าง
T_L	=	แรงบิดโหลด
T_m	=	แรงบิดมอเตอร์
\vec{t}	=	เวกเตอร์การเลื่อนที่
θ	=	มุมหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก
θ_d, θ_L	=	มุมหมุน อินพุต-เอาต์พุต รอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก
θ_p	=	มุมการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

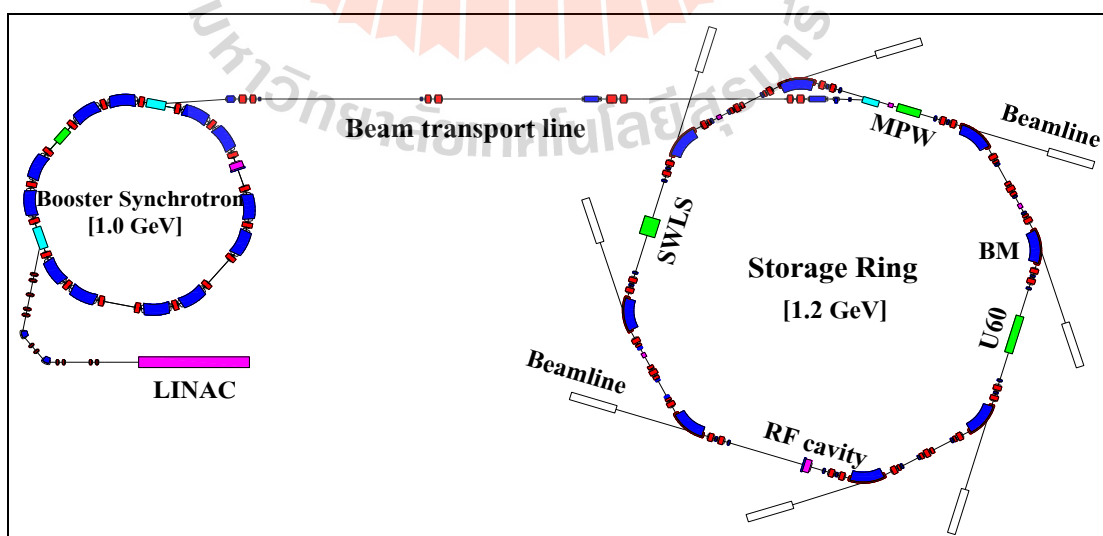
$U60$	=	แม่เหล็กอินดิวเตอร์
$U(s)$	=	สัญญาณควบคุมระบบในรูป s โดเมน
u	=	สัญญาณควบคุมระบบ
V_a	=	แรงดันไฟฟ้าอาร์มาเจอร์
v	=	การเคลื่อนที่ในแนวแกน y
v_d, v_L	=	อินพุต – เอาต์พุต ของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y
w	=	การเคลื่อนที่ในแนวแกน z
x	=	ค่าพิกัดในแนวแกน x
x_1, x_2, x_3	=	ตัวแปรสถานะ 1, 2 และ 3
$\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$	=	การประมาณค่าเวกเตอร์สถานะ 1, 2 และ 3
$Y(s)$	=	เอาต์พุตของระบบในรูป s โดเมน
y	=	ค่าพิกัดในแนวแกน y
y	=	สัญญาณเอาต์พุต
\hat{y}	=	การประมาณค่าเอาต์พุตของระบบ
z	=	ค่าพิกัดในแนวแกน z

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ขนาดเส้นรอบวงโคจร 83 เมตร และมีค่าอิมิตแตนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 41 nm-rad ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยสถาบันฯ มีหน้าที่ผลิตและให้บริการแสงซินโครตรอนสำหรับงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐานและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มีสถานียทดลองตามเทคนิคต่างๆ ดังนี้ เทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy ใช้ศึกษาโครงสร้างสสารในระดับอะตอม เทคนิค X-ray Imaging Microscopy ใช้ศึกษาการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ เทคนิค Small Angle X-ray Scattering ใช้ศึกษาขนาดและโครงสร้างระดับนาโนเมตร เทคนิค Photoelectron Emission Spectroscopy ใช้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์บริเวณพื้นผิววัสดุ เทคนิค Infrared Spectroscopy ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างโมเลกุลของสาร เทคนิค X-ray Lithography ใช้ศึกษาการผลิตชิ้นส่วนจุลภาค และเทคนิค X-ray Crystallography ใช้ศึกษาโครงสร้างสามมิติของโปรตีนและโมเลกุลอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยแผนภาพของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแสดงได้ดังรูปที่ 1.1



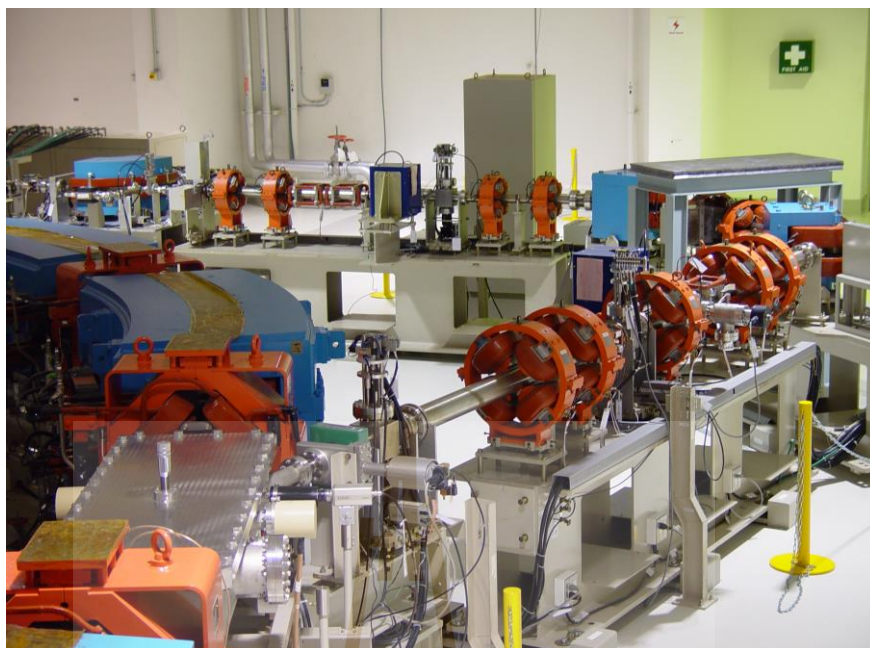
รูปที่ 1.1 แผนภาพของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วย LINAC และ Booster Synchrotron ส่วนที่สองเป็นวงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage Ring) และส่วนที่สามเป็นสถานีทดลอง (Beamline)

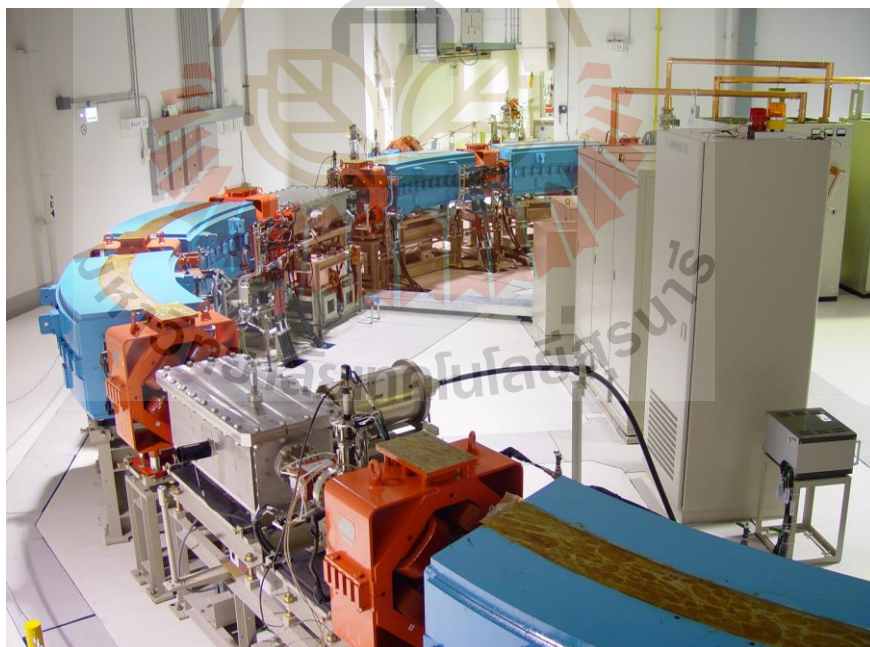
ระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอนส่วนแรกคือเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear Accelerator, LINAC) เป็นส่วนที่ผลิตอิเล็กตรอนและเร่งอิเล็กตรอนครั้งแรกด้วยสนามไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟกำลังสูง ความถี่ 2,856 MHz ภายในท่อเร่งอนุภาคแนวตรง ทำให้อิเล็กตรอนมีค่าพลังงาน 40 MeV เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster Synchrotron) โดยระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 และเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมแสดงได้ดังรูปที่ 1.4 ในส่วนนี้อิเล็กตรอนจะถูกเร่งอีกครั้งด้วยสนามไฟฟ้าจากคลื่นวิทยุกำลังสูง ความถี่ 118 MHz ภายในโพรงคลื่นวิทยุ (RF cavity) ขณะเดียวกันค่าสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ควบคุมเส้นทางวงโคจรของอิเล็กตรอนต้องสอดคล้องตามค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนถูกเร่งจนมีค่าพลังงาน 1.0 GeV และมีความเร็วใกล้ความเร็วของแสงแล้ว จะถูกส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงเข้าสู่ตัวกักเก็บอิเล็กตรอน โดยระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงแสดงได้ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.2 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง



รูปที่ 1.3 ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ



รูปที่ 1.4 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม



รูปที่ 1.5 ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง

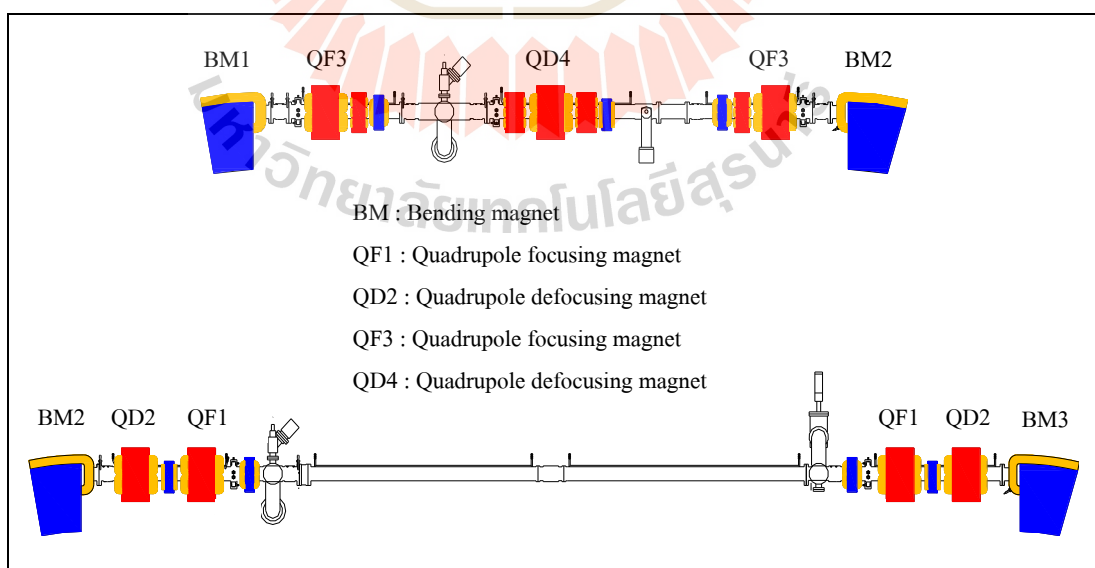
ในวงกักเก็บอิเล็กตรอนจะเพิ่มพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าจากคลื่นวิทยุกำลังสูง ความถี่ 118 MHz ภายในโพรงคลื่นวิทยุ ขณะเดียวกันค่าสนามแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ควบคุมวงโคจรของอิเล็กตรอนต้องสอดคล้องตามค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนถูกเร่งจนมีค่าพลังงาน 1.2 GeV แล้ว จะถูกกักเก็บไว้ภายในท่อสุญญากาศที่ความดันประมาณ 10^{-10} Torr โดยวงกักเก็บอิเล็กตรอนแสดงได้ดังรูปที่ 1.6 และแผนภาพการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ DBA (double bend achromats) แสดงได้ดังรูปที่ 1.7 เมื่อนำการจัดเรียงชุดแม่เหล็กดังกล่าวมาวางแบบสมมาตรกันจำนวน 4 ชุด จะได้การจัดเรียงแม่เหล็กทั้งหมดในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.1 (Mitsubishi, 2001) ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในเส้นทางวงโคจรภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ และขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านแม่เหล็กบังคับเลี้ยวโค้งจะปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในแนวสัมผัสกับการเลี้ยวโค้ง เราเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวว่า แสงซินโครตรอน (synchrotron light)

จากแผนภาพวงกักเก็บอิเล็กตรอนดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าแสงซินโครตรอนผลิตได้จากแม่เหล็กบังคับเลี้ยวโค้ง BM (bending magnet) ที่มีขนาดสนามแม่เหล็ก 1.2 เทสลาจำนวน 8 ชุด และยังผลิตได้จากอุปกรณ์แทรกต่าง ๆ ดังนี้ แม่เหล็ก U60 (undulator magnet) ที่มีขนาดสนามแม่เหล็ก 0.54 เทสลา ใช้เพิ่มความเข้มของแสงซินโครตรอน แม่เหล็ก MPW (multipole wiggler magnet) ที่มีขนาดสนามแม่เหล็ก 2.4 เทสลา และแม่เหล็ก SWLS (superconducting

wavelength shifter magnet) ที่มีขนาดสนามแม่เหล็ก 6.5 เทสลา โดยแม่เหล็กทั้งสองใช้ขยายช่วงพลังงานของแสงซินโครตรอนขึ้นไปถึงระดับรังสีเอ็กซ์พลังงานสูง



รูปที่ 1.6 วงกักเก็บอิเล็กตรอน

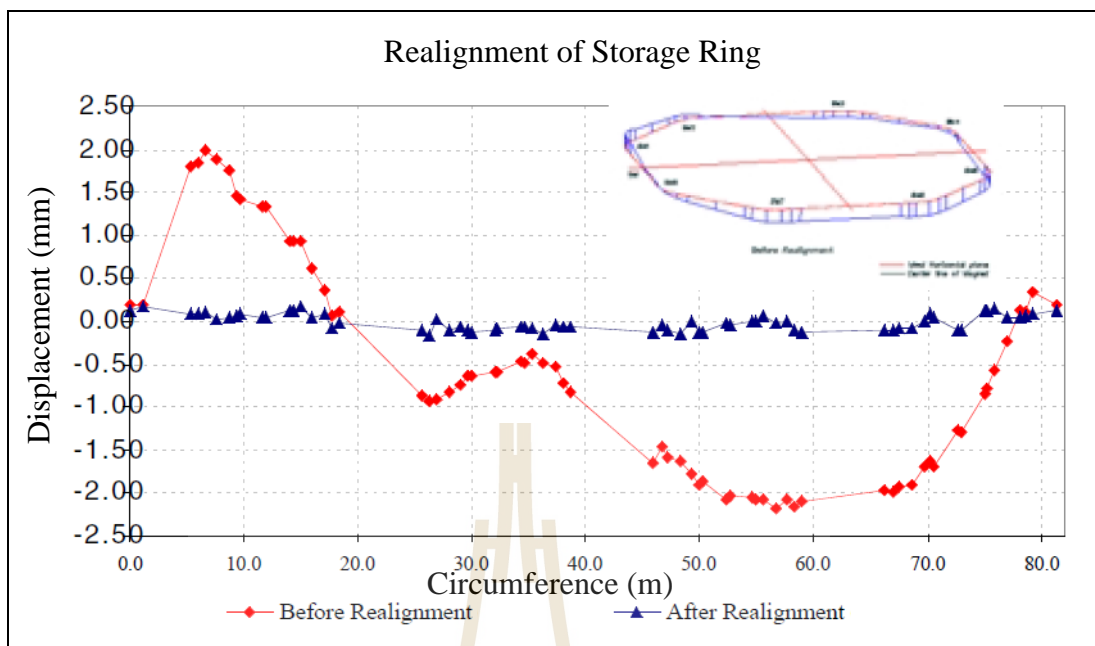


รูปที่ 1.7 แผนภาพการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ DBA ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน

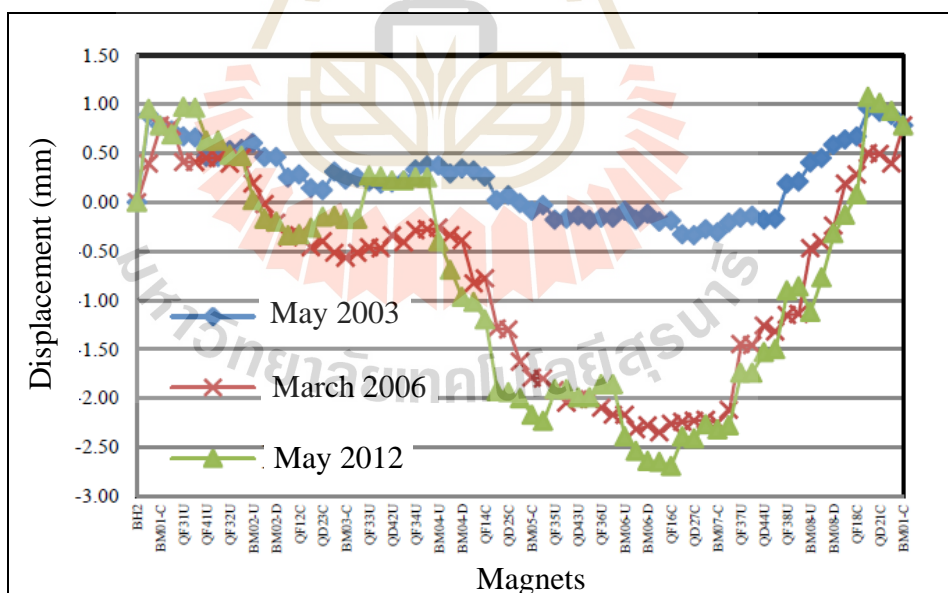
การผลิตแสงซินโครตรอนเพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องรักษาคุณภาพของแสงที่ผลิตออกมาให้คงที่ต่อเนื่องตลอดทั้งปี เช่น ขนาดและความเข้มของลำแสง ตำแหน่งของลำแสงที่ออกไปสู่สถานีทดลอง ฉะนั้นวงกักเก็บอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตแสงซินโครตรอนต้องมีเสถียรภาพไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น สุญญากาศภายในท่อลำเลียงอิเล็กตรอนต้องมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เมื่อค่าสุญญากาศต่ำลงทำให้อิเล็กตรอนเกิดการชนกับอนุภาคที่อยู่ในสถานะแก๊สมากขึ้นเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้ากำลังสูงความถี่ 118 MHz ต้องสามารถชดเชยให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนได้หลังการปลดปล่อยแสงซินโครตรอนออกมาในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่รอบวงโคจร แม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ที่ใช้บังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามวงโคจร จะต้องมีค่าสนามแม่เหล็กคงที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เมื่อสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ตำแหน่งของลำแสงที่ออกไปสู่สถานีทดลองเปลี่ยนแปลงด้วย อีกทั้งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของการกักเก็บอิเล็กตรอนลดน้อยลง นอกจากนี้ระบบสนับสนุน เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบน้ำหล่อเย็น และระบบปรับอากาศ ต้องมีค่าคงที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เพราะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของการกักเก็บอิเล็กตรอนลดน้อยลงเช่นกัน

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนติดตั้งแล้วเสร็จ และเริ่มให้บริการแสงซินโครตรอนแก่ผู้ใช้ ตั้งแต่เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2543 (Pairsuwan, 2001) หลังการติดตั้งแล้วเสร็จประมาณ 2 ปี ได้ตรวจพบว่าพื้นอาคารปฏิบัติการเกิดการทรุดตัวและเลื่อนตัวขึ้น ส่งผลให้แนวระนาบของวงกักเก็บอิเล็กตรอนมีค่าแตกต่างกันสูงถึง 4.2 มิลลิเมตร มีการดำเนินงานแก้ไขด้วยการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนใหม่ให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง การดำเนินงานแก้ไขปัญหาดังกล่าวใช้ระยะเวลานานประมาณ 3 เดือน ใช้บุคลากรที่มีประสบการณ์และความชำนาญจำนวนมาก การปรับตั้งให้ความแม่นยำต่ำ และพื้นที่การทำงานยังมีจำกัด โดยกราฟแสดงแนวระนาบของแม่เหล็กทั้งก่อนและหลังการปรับตั้งระดับและตำแหน่งในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ในปี พ.ศ. 2545 แสดงได้ดังรูปที่ 1.8 จะเห็นได้ว่าการปรับตั้งแล้วเสร็จแนวระนาบของแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง ± 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าพิกัดที่ถูกกำหนดไว้สำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (Sanguansak, 2002)

การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนยังคงดำเนินการต่อมาอีกในปี พ.ศ. 2549 และปี พ.ศ. 2555 เนื่องจากพื้นอาคารปฏิบัติการยังเกิดการทรุดตัวและเลื่อนตัวอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถตรวจวัดได้ว่าระนาบของแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ ± 1 มิลลิเมตรต่อปี โดยกราฟแสดงแนวระนาบของแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ในปี พ.ศ. 2546 ปี พ.ศ. 2549 และปี พ.ศ. 2555 แสดงได้ดังรูปที่ 1.9 จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสามมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าพื้นอาคารปฏิบัติการยังเกิดการทรุดตัวและเลื่อนตัวในรูปแบบเดียวกันอย่างต่อเนื่อง (Srichan, 2012)



รูปที่ 1.8 กราฟแสดงแนวระนาบของแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ในปี พ.ศ. 2545

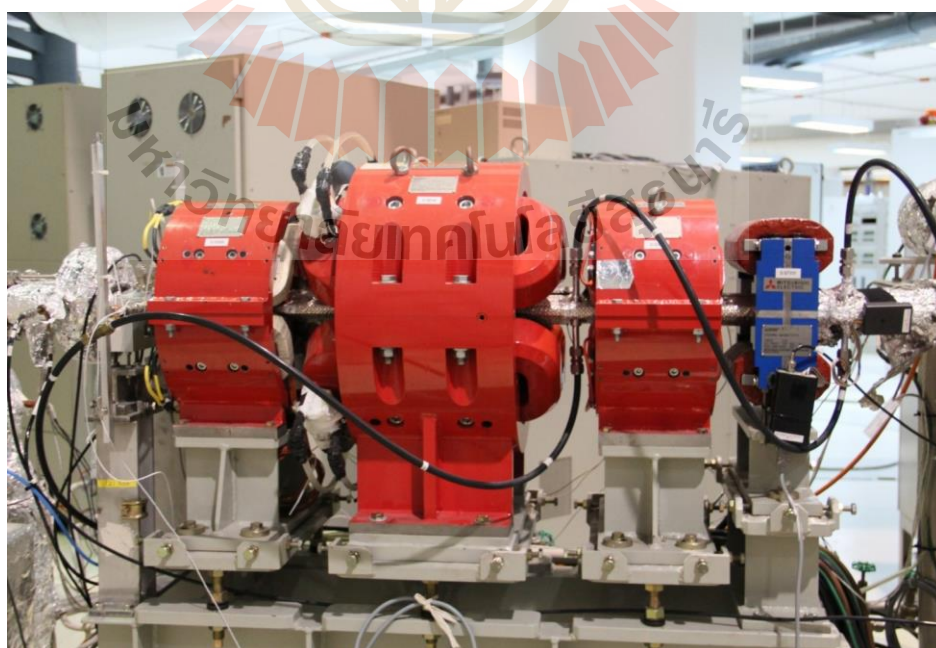


รูปที่ 1.9 กราฟแสดงแนวระนาบของแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอนในปี พ.ศ. 2546
ปี พ.ศ. 2549 และปี พ.ศ. 2555

การติดตั้งแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ และการติดตั้งท่อลำเลียงอิเล็กตรอนเข้ากับชุดแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอน แสดงได้ดังรูปที่ 1.10 และรูปที่ 1.11 ตามลำดับ

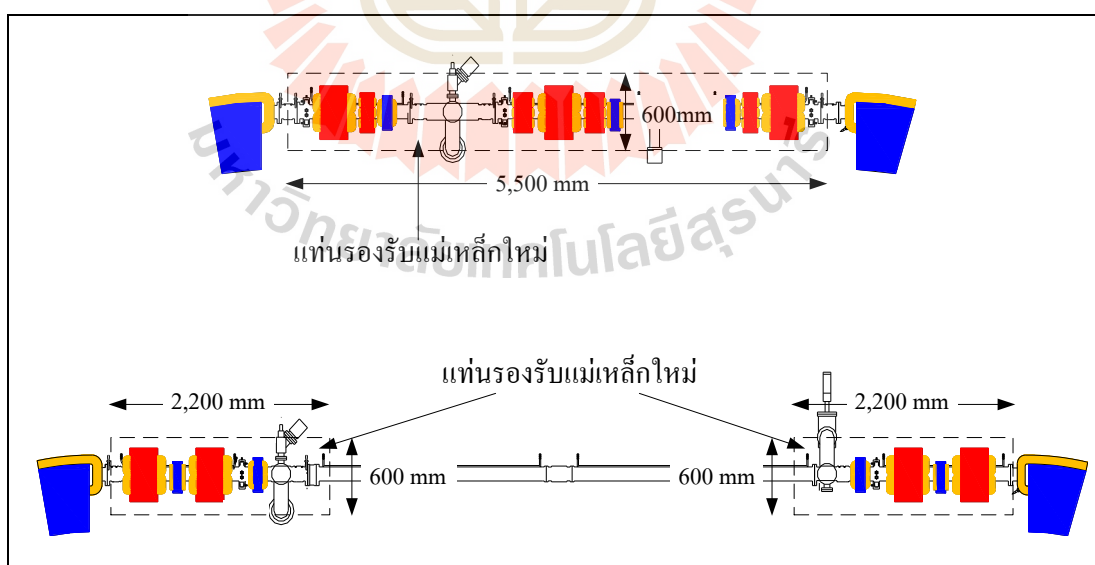


รูปที่ 1.10 การติดตั้งแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน



รูปที่ 1.11 การติดตั้งท่อลำเลียงอิเล็กตรอนเข้ากับชุดแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอน

ในปัจจุบันวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ผลิตแสงซินโครตรอนเพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี ขณะที่การทรุดและเลื่อนตัวของพื้นอาคารปฏิบัติการยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อต้องดำเนินงานปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กทรอนิกส์ใหม่ให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง การดำเนินงานต้องอาศัยบุคลากรที่มีประสบการณ์และความชำนาญจำนวนมาก การปรับตั้งให้ความแม่นยำต่ำ และยังใช้ระยะเวลานานหลายเดือน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งานให้บริการแสงซินโครตรอนแก่ผู้ใช้ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะดำเนินการออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กทรอนิกส์ให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้ และการจัดวางตัวแท่นรองรับแม่เหล็กให้มีความเหมาะสมต่อวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญมากเช่นกัน จากแผนภาพการจัดเรียงชุดแม่เหล็กดังในรูปที่ 1.7 เมื่อดำเนินการจัดวางระบบแท่นรองรับแม่เหล็กใหม่ให้มีความเหมาะสม ดังที่แสดงในรูปที่ 1.12 จะเห็นได้ว่าของระบบเดิมจะต้องทำการปรับตั้งแม่เหล็กทุกตัวแบบแยกอิสระจากกัน ทำให้การปรับตั้งมีมากตามจำนวนแม่เหล็กที่มีใช้งาน เมื่อจัดวางระบบแท่นรองรับแม่เหล็กใหม่แล้ว จะทำให้การปรับตั้งเป็นไปตามจำนวนของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก และถ้าหากการปรับตั้งระดับและตำแหน่งเปลี่ยนเป็นแบบปรับตั้งอัตโนมัติได้ การดำเนินงานจะใช้บุคลากรจำนวนน้อย การปรับตั้งให้ความละเอียดและแม่นยำสูง และการดำเนินงานจะใช้ระยะเวลาสั้นมาก



รูปที่ 1.12 แผนภาพการจัดวางระบบแท่นรองรับแม่เหล็กใหม่ในวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์

ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของแท่นรองรับแม่เหล็กที่เคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ เพื่อใช้ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้ โดยการออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก (magnet girder system) จะใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง (eccentric circle cam actuator system) จำนวน 3 ชุด เป็นตัวขับเคลื่อนให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก (magnet girder) เกิดการเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ (degrees of freedom, DOF) ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) ระบบขับเคลื่อนจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (permanent magnet DC motor) เป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการหมุนและส่งกำลังผ่านชุดเฟืองตัวหนอน (worm gearbox) ผ่านชุดเฟืองเพลาเนตตารี (planetary gearbox) ให้กับลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ (automatic control system) จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กและระบบขับเคลื่อนที่จะประมาณขึ้น จะใช้การประมาณแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น (linearization) จะใช้สมการจลนศาสตร์ผกผัน (inverse kinematics equation) คำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อน จะใช้การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุน (angular position control) ให้กับระบบขับเคลื่อน ใช้การควบคุมแบบดั้งเดิม (classical control) ที่อาศัยฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของระบบพลวัต และตัวควบคุมแบบพีไอ (proportional-integral controller) และใช้การควบคุมสมัยใหม่ (modern control) ที่อาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะ (state space model) ของระบบพลวัต ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ (state feedback control) ร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ (full-order state observer) จะใช้เอ็นโคเดอร์แกนหมุนแบบเพิ่มค่า (incremental rotary encoder) วัดตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อน ใช้ตัวตรวจรู้ระยะทาง (displacement sensor) วัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน y และใช้ตัวตรวจรู้มุมเอียง (inclinometer sensor) วัดมุมการหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ให้กับตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก การควบคุมการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กจะใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (integral controller) โดยจะมีการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบและการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ ทั้งนี้ ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจะสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง (reference trajectory tracking) และแบบคงค่าเอาต์พุต (output regulation) การเคลื่อนไหวจะมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x มุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และการหมุนรอบแนวแกน z มุมหมุน ± 30 มิลลิเรเดียน เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง และแบบคงค่าเอาต์พุต การเคลื่อนไหวมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่เคลื่อนไหวอัตโนมัติได้

1.2.3 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กและระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้

1.3 ขอบเขตทางวิศวกรรม

1.3.1 การออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่ระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x ที่มุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และการหมุนรอบแนวแกน z ที่มุมหมุน ± 30 มิลลิเรเดียน

1.3.2 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติจะทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง และแบบคงค่าเอาต์พุต การเคลื่อนไหวมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ

1.3.3 การออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่สามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จะมุ่งเน้นที่การออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ การเคลื่อนที่ในแนวแกน y ระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x มุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และการหมุนรอบแนวแกน z มุมหมุน ± 30 มิลลิเรเดียน

1.4.2 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติ จะมุ่งเน้นที่ระบบควบคุมทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง และแบบคงค่าเอาต์พุต การเคลื่อนไหวมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เครื่องต้นแบบระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่เคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่ระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x ที่มุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และการหมุนรอบแนวแกน z ที่มุมหมุน ± 30 มิลลิเรเดียน ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต การเคลื่อนไหวมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้

1.5.2 ได้เกิดพัฒนาการในเทคโนโลยีการสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กและระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บทที่ และ 3 ภาคผนวก บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อสมมติทางวิศวกรรม ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ บทอื่น ๆ มีเนื้อหาสรุปได้ดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เทคนิคการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่อาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนและตัวควบคุมแบบพีไอดี ระบบควบคุมสมัยใหม่ที่อาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะสภาพควบคุมได้และสภาพสังเกตได้ การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ การออกแบบตัวสังเกตสถานะ การทำให้เป็นเชิงเส้น ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว และเสถียรภาพของระบบ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก การประมาณการหมุนให้เป็นเชิงเส้น การหาสมการจลศาสตร์ผกผัน การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อน การจำลองสถานการณ์การเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดขนาดและมิติโครงสร้าง การจัดสร้างชิ้นงานและประกอบติดตั้ง การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเคลื่อนและการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหวมัลติการวัดและระบบเอกลักษณ์พารามิเตอร์ที่วัดค่าไม่ได้ของระบบขับเคลื่อน การออกแบบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุม การหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ (รูปควบคุมด้านใน) การออกแบบการควบคุมการเคลื่อนไหวมัลติการวัดของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (รูปควบคุมด้านนอก) ทั้งการเคลื่อนไหบบนตามรอยแนววิถีอ้างอิง และแบบคงค่าเอาต์พุต การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ การจำลองสถานการณ์ และการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจวัด

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบการเคลื่อนไหวมัลติการวัดของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น การติดตั้งอุปกรณ์และต่อประสาน การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB/Simulink การทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ การทดสอบการเคลื่อนไหวมัลติการวัดของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. โปรแกรมคำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 และโปรแกรมคำนวณ Heave, Pitch และ Roll ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

ภาคผนวก ข. อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการประกอบติดตั้ง

ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยทั่วไป การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง มีการใช้เทคนิค ดังนี้ การปรับตั้งด้วยสลักเกลียวและน็อต การปรับตั้งด้วยแม่แรงลิ้ม และการปรับตั้งด้วยลูกเบี้ยว วงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง จากนั้นกล่าวถึงระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่อาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบและตัวควบคุมแบบพีไอดี ระบบควบคุมสมัยใหม่ที่อาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบ สภาพควบคุมได้และสภาพสังเกตได้ของระบบพลวัต การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล การออกแบบตัวสังเกตสถานะ การทำให้เป็นเชิงเส้น ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว เสถียรภาพของระบบ และสรุป

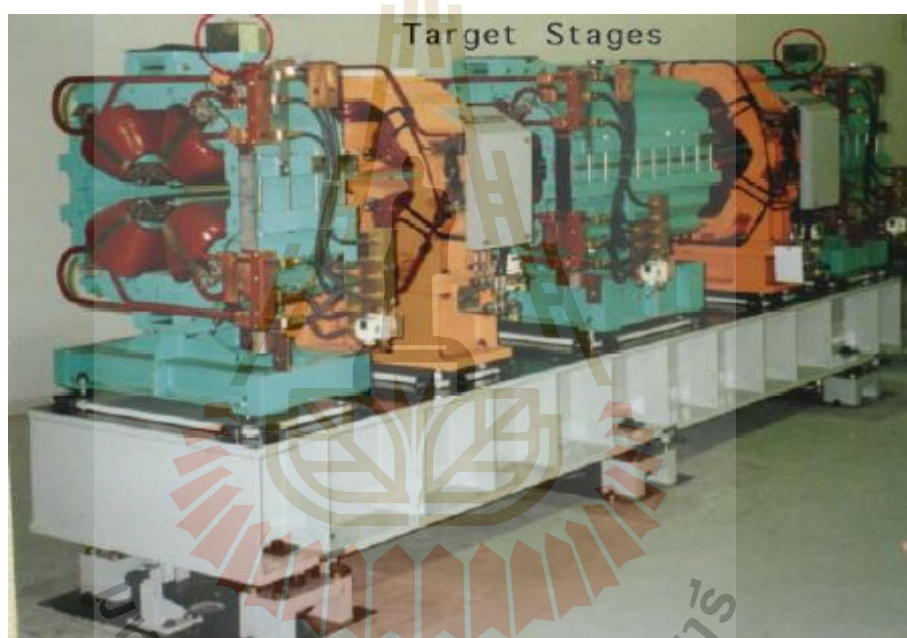
2.2 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กเป็นส่วนที่ใช้ติดตั้งแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ และท่อลำเลียงอิเล็กตรอน ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง ไม่ควรเกิดการขีดตัวหรือหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อย และเทคนิคการปรับตั้งมีดังนี้ การปรับตั้งด้วยสลักเกลียวและน็อต การปรับตั้งด้วยแม่แรงลิ้ม และการปรับตั้งด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง

2.2.1 เทคนิคการปรับตั้งด้วยสลักเกลียวและน็อต

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์มหาชน) ที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 1.2 GeV เส้นรอบวงโคจร 83 เมตร มีการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ DBA จำนวน 4 ชุด และมีค่าอิมิตแดนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 41 nm-rad โดยตัวแท่นรองรับแม่เหล็กถูกยึดติดไว้กับพื้นของอาคาร ใช้การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ด้วยเทคนิควิธีของสลักเกลียวและน็อตแบบแยกอิสระกันทุกตัว เมื่อมีการดำเนินงานปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนใหม่ จะใช้ระยะเวลายาวนานประมาณ 3 เดือน และต้องอาศัยบุคลากรที่มีประสบการณ์และความชำนาญเป็นจำนวนมาก (Sanguansak, 2002 และ Srichan, 2012) โดยตัวแท่นรองรับแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.6 รูปที่ 1.10 และรูปที่ 1.11

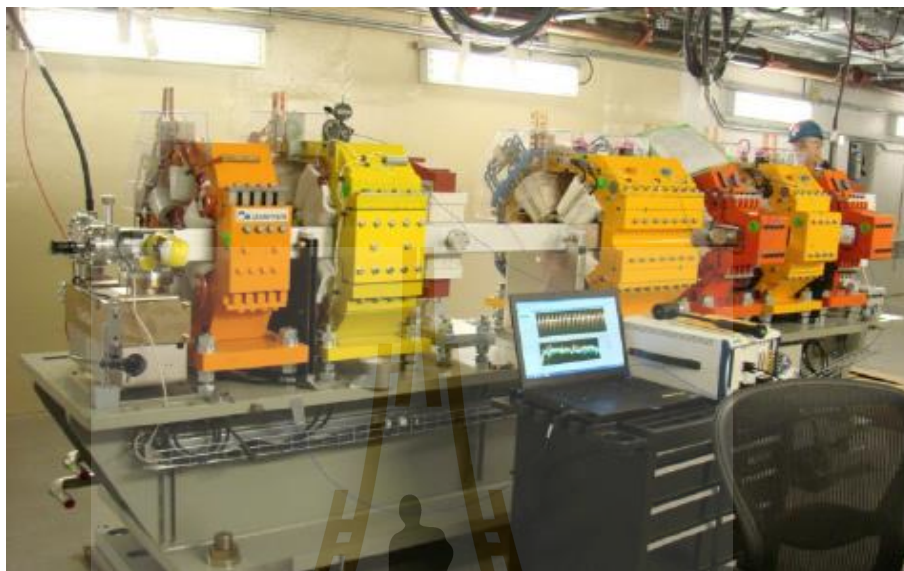
SPring-8 ประเทศญี่ปุ่น ที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 8 GeV เส้นรอบวงโคจร 1,436 เมตร มีการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ DBA จำนวน 48 ชุด และมีค่าอิมิตแดนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 3 nm-rad โดยที่ SPring-8 ตั้งอยู่บนพื้นที่ของหินแข็ง และระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีการติดตั้งชุดแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนไว้ ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง การยึดตัว การหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อย การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ใช้เทคนิคการปรับตั้งด้วยสลักเกลียวและน็อต และกำหนดค่าการปรับตั้งให้อยู่ในช่วง ± 0.05 มิลลิเมตร (Matsui, 1995 และ Tsumaki, 2002) โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ Spring-8 ประเทศญี่ปุ่น แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ Spring-8 ประเทศญี่ปุ่น

National Synchrotron Light Source II (NSLS-II) ที่ Brookhaven National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 3 GeV เส้นรอบวงโคจร 792 เมตร มีการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ DBA จำนวน 30 ชุด และมีค่าอิมิตแดนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 2 nm-rad โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีการติดตั้งชุดแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนไว้ ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง การยึดตัว การหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อยมาก การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ใช้เทคนิคการปรับตั้งด้วยสลักเกลียวและน็อต และกำหนดค่าการปรับตั้งให้อยู่ในช่วง

± 0.03 มิลลิเมตร (Sharma, 2011 และ Willeke, 2015) โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ NSLS-II ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



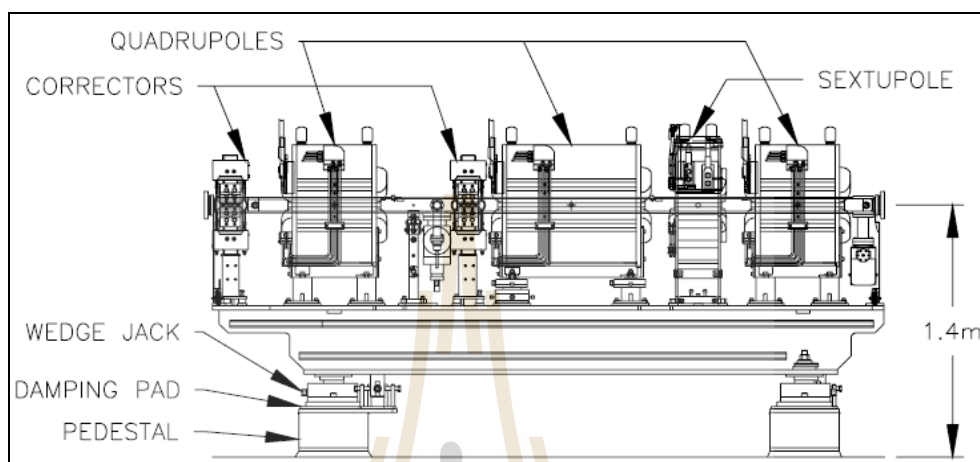
รูปที่ 2.2 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ NSLS-II ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2.2 เทคนิคการปรับตั้งด้วยแม่แรงลิ้ม

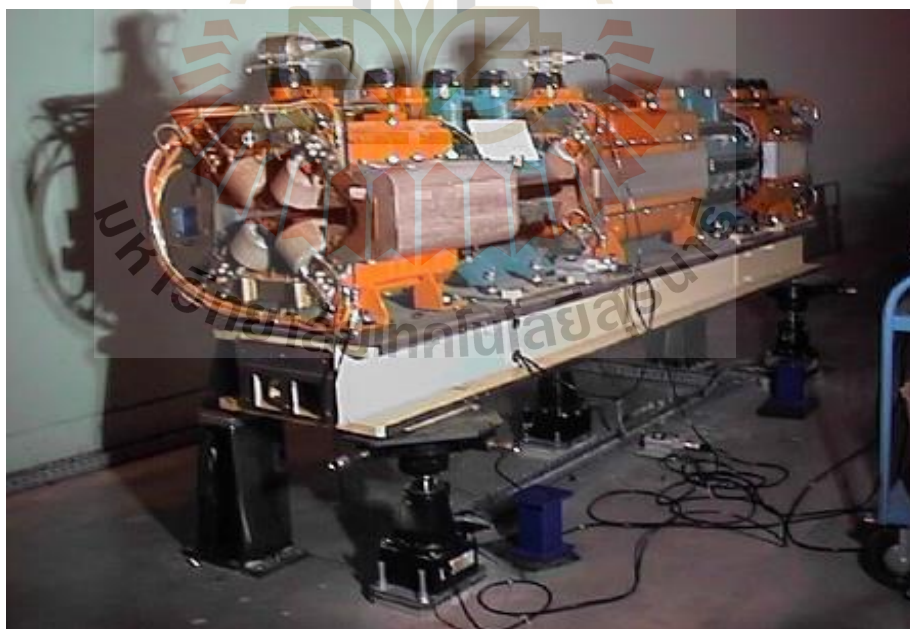
Advanced Photon Source (APS) ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 7 GeV เส้นรอบวงโคจร 1,104 เมตร และมีค่าอิมิตแดนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 3 nm-rad โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีการติดตั้งชุดแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนไว้ ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง การยึดตัว การหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อย ใช้เทคนิคการปรับตั้งด้วยแม่แรงลิ้มจำนวน 3 ชุด ร่วมกับสลักเกลียวและน็อต และกำหนดค่าการปรับตั้งให้อยู่ในช่วง ± 0.2 มิลลิเมตร (Friedsam, 1993 และ Mangra, 2000) โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ APS ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงได้ดังรูปที่ 2.3

European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) ประเทศฝรั่งเศส มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 6 GeV เส้นรอบวงโคจร 844 เมตร และมีค่าอิมิตแดนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 3.8 nm-rad โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีการติดตั้งชุดแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนไว้ ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง การยึดตัว การหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อย การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ใช้เทคนิคการปรับตั้งด้วยแม่แรงลิ้มที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนจำนวน 3 ชุด และใช้การเขียนชุดคำสั่ง

ควบคุมการขับเคลื่อน ร่วมกับสลักเกลียวและน็อต และกำหนดค่าการปรับตั้งให้อยู่ในช่วง ± 0.2 มิลลิเมตร (Roux, 1989, Roux, 1993 และ Zhang, 2001) โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ ESRF ประเทศฝรั่งเศส แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



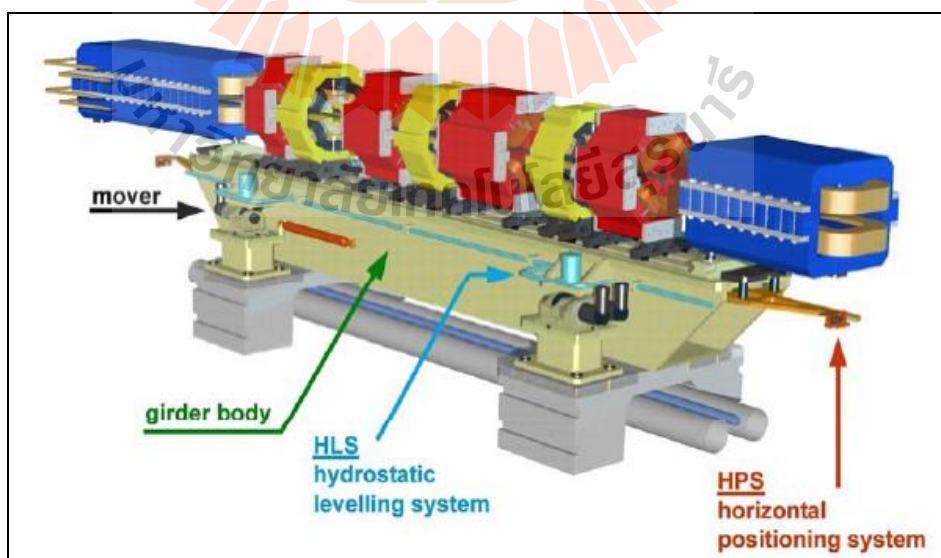
รูปที่ 2.3 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ APS ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 2.4 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ ESRF ประเทศฝรั่งเศส

2.2.3 เทคนิคการปรับตั้งด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง

Swiss Light Source (SLS) ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 2.4 GeV เส้นรอบวงโคจร 288 เมตร มีการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ TBA (triple bend achromats) จำนวน 12 ชุด และมีค่าอิมิตแดนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 4 nm-rad โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีการติดตั้งชุดแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนไว้ ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง การยึดตัว การหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อยมาก การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ใช้เทคนิคการปรับตั้งด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Stanford Linear Accelerator Center, SLAC (Bowden, 1995) ร่วมกับสลักเกลียวและน็อต ตัวแท่นรองรับถูกขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง ที่ประกอบด้วยมอเตอร์ เฟืองตัวหนอน เฟืองเพลา เนตตารี ลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง และตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ในการควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก ใช้การเขียนชุดคำสั่งควบคุมที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางจำนวน 5 ชุด กับการหมุน Pitch, Yaw และ Roll และการเลื่อนที่ Sway และ Heave ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก (Axyz software และ IDL software) ซึ่งการเขียนชุดคำสั่งควบคุมต้องอาศัยทั้งประสบการณ์และความชำนาญสูง และกำหนดค่าการปรับตั้งให้อยู่ในช่วง ± 0.05 มิลลิเมตร (Streun, 2000, Zelenika, 2001 และ Wei, 2002) โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ SLS ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5

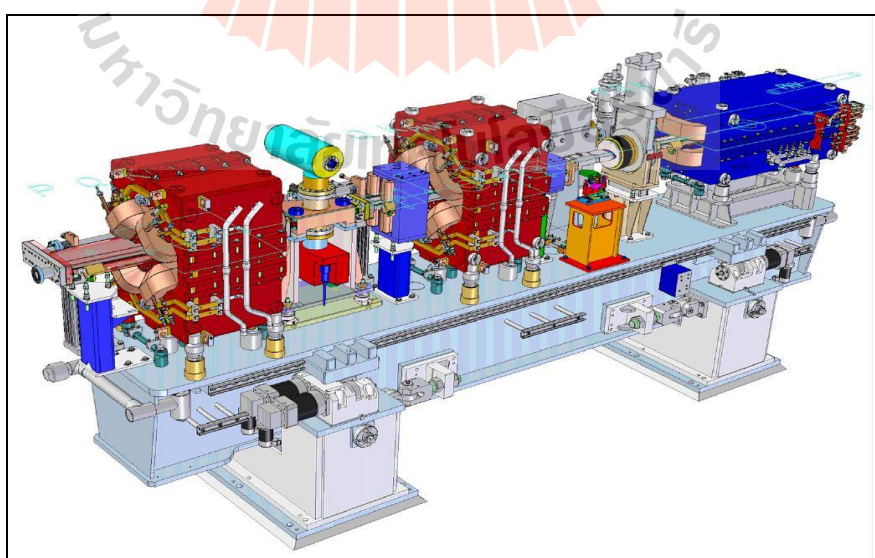


รูปที่ 2.5 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ SLS ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

Diamond Light Source (DIAMOND) ประเทศอังกฤษ ที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 3 GeV เส้นรอบวงโคจร 561.6 เมตร มีการจัดเรียงชุดแม่เหล็กแบบ DBA จำนวน 24 ชุด และมีค่าอิมิตแตนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 2.8 nm-rad โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีการติดตั้งชุดแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนไว้ ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง การยึดตัว การหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อยมาก การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ใช้เทคนิคการปรับตั้งเช่นเดียวกันกับที่ SLS ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ และกำหนดค่าการปรับตั้งให้อยู่ในช่วง ± 0.04 มิลลิเมตร (Martin, 2006 และ Wilson, 2006)

PETRA III ที่ Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) ประเทศเยอรมัน ที่มีวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดพลังงาน 6 GeV เส้นรอบวงโคจร 2,304 เมตร และมีค่าอิมิตแตนซ์ของลำอิเล็กตรอนประมาณ 1 nm-rad โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีการติดตั้งชุดแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนไว้ ตัวโครงสร้างแท่นรองรับมีความมั่นคงและแข็งแรง การยึดตัว การหดตัว และการเปลี่ยนรูปร่างมีค่าน้อยมาก การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง ใช้เทคนิคการปรับตั้งเช่นเดียวกันกับที่ SLS ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ และ DIAMOND ประเทศอังกฤษ (Balewski, 2008 และ Wanzenberg, 2015) โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ PETRA III ประเทศเยอรมัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.6

โดยสามารถสรุปเทคนิคการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่มีใช้งาน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.6 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ PETRA III ประเทศเยอรมัน

ตารางที่ 2.1 เทคนิคการปรับปรุงแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

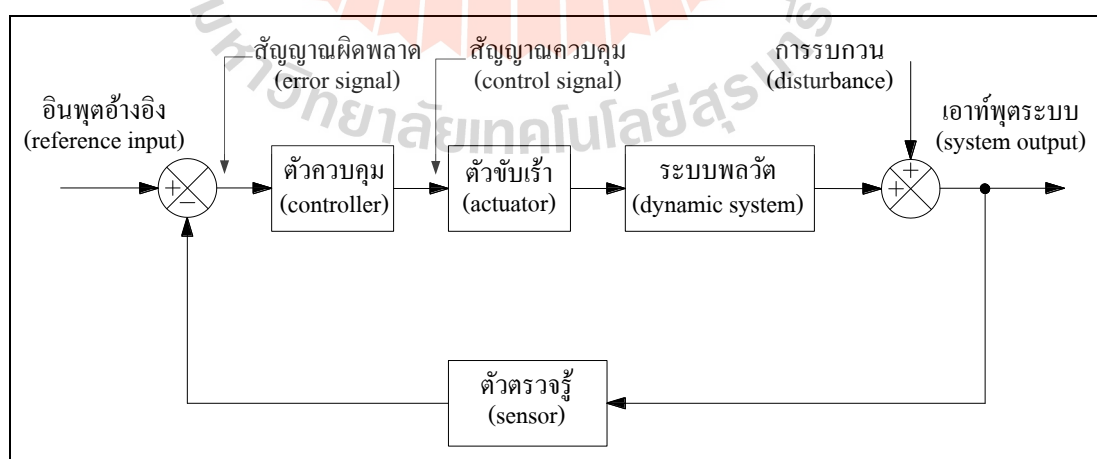
วงกักเก็บอิเล็กตรอน	ปี พ.ศ.	เทคนิคการที่ใช้ในการปรับปรุง	ระบบเพื่ารองรับแม่เหล็ก	ระบบควบคุมอัตโนมัติ	หมายเหตุ
Spring-8	2538	สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอยู่บนตัวแท่นรองรับ	ไม่มี	เวลาดำเนินงานนาน
SLRI	2545	สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอิสระจากกันทุกตัว	ไม่มี	เวลาดำเนินงานนาน
NSLS-II	2554	สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอยู่บนตัวแท่นรองรับ	ไม่มี	เวลาดำเนินงานนาน
APS	2543	แม่แรงลิ้ม สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอยู่บนตัวแท่นรองรับ	ไม่มี	เวลาดำเนินงานนาน
ESRF	2544	แม่แรงลิ้มขั้วรับเร้าด้วยมอเตอร์ สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอยู่บนตัวแท่นรองรับ	ชุดคำสั่งควบคุม	เวลาดำเนินงานนาน
SLS	2544	ลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางขั้วรับเร้าด้วยมอเตอร์ สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอยู่บนตัวแท่นรองรับ	ชุดคำสั่งควบคุม Axyz software และ IDL software	เวลาดำเนินงานสั้น
DIAMOND	2549	ลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางขั้วรับเร้าด้วยมอเตอร์ สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอยู่บนตัวแท่นรองรับ	ใช้เทคนิคเดียวกันกับ SLS	เวลาดำเนินงานสั้น
PETRA III	2551	ลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางขั้วรับเร้าด้วยมอเตอร์ สลักเกลียวและน็อต	แม่เหล็กและท่อลำเลียงติดตั้งอยู่บนตัวแท่นรองรับ	ใช้เทคนิคเดียวกันกับ SLS	เวลาดำเนินงานสั้น

2.3 ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม

ระบบควบคุมแบบดั้งเดิมเป็นการออกแบบและวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ และอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายระบบพลวัตในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ การควบคุมจะไม่ได้ใช้ข้อมูลและรายละเอียดทางพลวัตภายในของระบบ ทั้งนี้ระบบควบคุมแบบดั้งเดิมจะใช้ได้กับระบบที่มีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว (single-input, single-output, SISO) และระบบที่เป็นระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (linear time-invariant, LTI)

2.3.1 การควบคุมแบบวงปิด

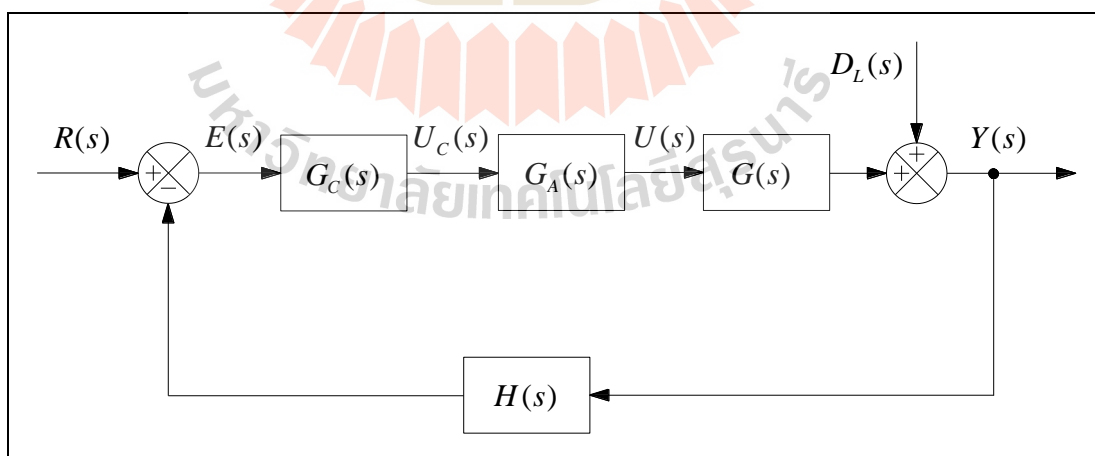
การควบคุมแบบวงเปิด (open-loop control) จะมีปัญหาด้านเสถียรภาพของระบบ เพราะไม่มีการป้อนกลับของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต ซึ่งทำให้ระบบมีความไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานหลายอย่าง เพราะฉะนั้นจะต้องออกแบบระบบควบคุมที่สามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนหรือข้อผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตของระบบให้ได้ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นการควบคุมแบบวงปิด (closed-loop control) หรือการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) ขึ้นมา เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากการควบคุมแบบวงเปิด โดยแผนภาพบล็อกโครงสร้างของระบบควบคุมแบบวงปิด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าการป้อนกลับแบบลบเพราะสัญญาณจากตัวตรวจรู้ถูกนำไปหักล้างกับอินพุตอ้างอิง จากนั้นสัญญาณผิดพลาดถูกป้อนเข้าสู่ตัวควบคุม ในส่วนตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมส่งให้ตัวขับเคลื่อนทำงาน โดยที่เอาต์พุตของตัวขับเคลื่อนเป็นอินพุตให้กับระบบพลวัต แล้วทำการวัดค่าเอาต์พุตระบบแล้วป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิง เพื่อให้ค่าสัญญาณผิดพลาดมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.7 แผนภาพบล็อกโครงสร้างของระบบควบคุมแบบวงปิด

การควบคุมแบบวงปิดเป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมระบบพลวัต มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางและแพร่หลาย เพราะมีความได้เปรียบเหนือกว่าระบบควบคุมแบบวงเปิด เช่น สามารถกำจัดการรบกวนจากภายนอกที่เข้ามาในระบบได้ การควบคุมลักษณะนี้จะทำให้ระบบมีสถานะคงที่ได้และสามารถสร้างสมรรถนะของระบบได้สูงขึ้น ถึงแม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีตัวแปรที่มีความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วยก็ตาม ระบบที่ไม่มีเสถียรภาพโดยธรรมชาติอยู่แล้วสามารถทำให้เกิดเสถียรภาพได้เมื่อมีการติดตั้งตัวควบคุมที่มีความเหมาะสม และทำให้ระบบมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงได้สูงขึ้น

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของระบบต่ออินพุตของระบบ โดยรายละเอียดย่อยทางพลวัตของระบบจะถูกรวมไว้ในตัวฟังก์ชันถ่ายโอน และภายใต้สมมุติฐานที่ว่าเงื่อนไขเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีความสมเหตุสมผลกับระบบจริงมากที่สุดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาระบบควบคุมที่เหมาะสมต่อไป จากรูปที่ 2.7 สามารถเขียนแผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบวงปิดเมื่อพิจารณาการแปลงลาปลาซของฟังก์ชัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า $R(s)$ คืออินพุตอ้างอิง $E(s)$ คือสัญญาณผิดพลาด $G_C(s)$ คือตัวควบคุม $U_C(s)$ คือสัญญาณควบคุมตัวขับเคลื่อน $G_A(s)$ คือตัวขับเคลื่อน $U(s)$ คือสัญญาณควบคุมระบบพลวัต $G(s)$ คือระบบพลวัต $D_L(s)$ คือการรบกวนจากภายนอก $Y(s)$ คือเอาต์พุตของระบบ และ $H(s)$ คือตัวตรวจรู้เอาต์พุตของระบบ (Johnson, 2005)



รูปที่ 2.8 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบวงปิด

จากรูปที่ 2.8 สมการเอาต์พุตของระบบหาได้จากสมการที่ (2-1)

$$Y(s) = G(s)U(s) + D_L(s) \quad (2-1)$$

เนื่องจาก $U(s) = G_A(s)U_C(s)$, $U_C(s) = G_C(s)E(s)$ และ $E(s) = R(s) - H(s)Y(s)$ เมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการที่ (2-1) จะได้สมการเอาต์พุตของระบบดังนี้

$$\begin{aligned} Y(s) &= G(s)G_A(s)G_C(s)(R(s) - H(s)Y(s)) + D_L(s) \\ &= \frac{G(s)G_A(s)G_C(s)R(s)}{1 + G(s)G_A(s)G_C(s)H(s)} + \frac{D_L(s)}{1 + G(s)G_A(s)G_C(s)H(s)} \end{aligned} \quad (2-2)$$

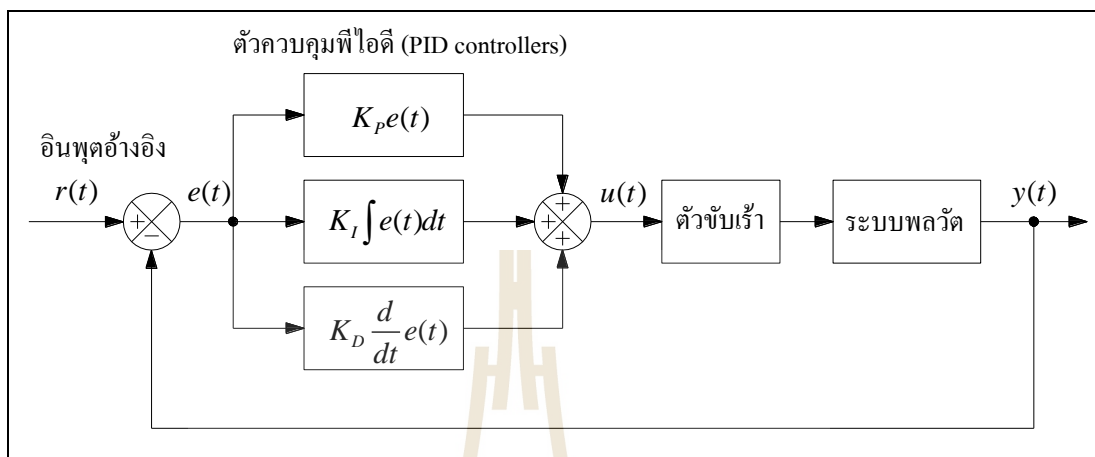
จากสมการที่ (2-2) ถ้าหากไม่พิจารณาการรบกวนจากภายนอก $D_L(s)$ หรือกำหนดให้มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)G_A(s)G_C(s)}{1 + G(s)G_A(s)G_C(s)H(s)} \quad (2-3)$$

2.3.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controllers) ประกอบไปด้วย ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional controller) โดยสัญญาณควบคุมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผลต่างอินพุตอ้างอิงกับเอาต์พุตของระบบ ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (integral controller) จะขึ้นอยู่กับค่าในอดีตไม่เหมือนกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ใช้เพื่อลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวและในขณะเดียวกันเสถียรภาพของระบบจะลดลง และการควบคุมจะเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบพลวัต ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบปริพันธ์เราเรียกตัวควบคุมแบบพีไอ (PI-controllers) ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (derivative controller) ปกติจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมชนิดอื่น เช่น ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน เราเรียกตัวควบคุมแบบพีดี (PD-controllers) ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วงให้กับระบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ถ้าหากสัญญาณผิดพลาดนั้นมีสัญญาณการรบกวนมากจะทำให้เอาต์พุตของระบบเกิดการกระเพื่อมค่อนข้างมาก ถ้าหากค่าความชันของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงมากจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้ ทั้งนี้ตัวควบคุมแบบพีไอดีได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางและแพร่หลาย มีการใช้งานกันมาอย่างยาวนานและมีความน่าเชื่อถือสูงในด้านของประสิทธิภาพ รวมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม

แบบพีไอดีมีความเรียบง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยแผนภาพบล็อกโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 (Johnson, 2005 และ Ogata, 2010)



รูปที่ 2.9 แผนภาพบล็อกโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอดี

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2-4)$$

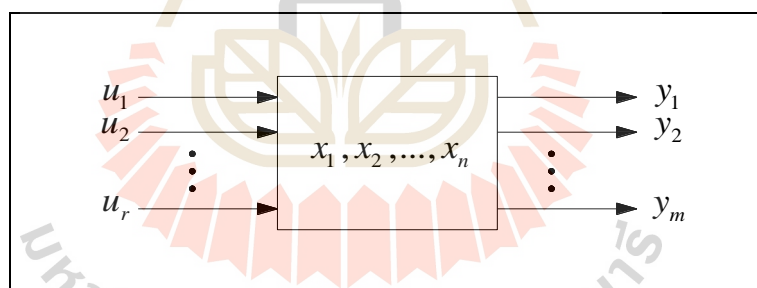
โดยที่	$u(t)$	คือ สัญญาณควบคุมที่ส่งเข้าสู่ตัวขับเคลื่อน
	$r(t)$	คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง
	$y(t)$	คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบ
	$e(t)$	คือ สัญญาณผิดพลาดระหว่างอินพุตอ้างอิงกับเอาต์พุตของระบบ
	$K_p e(t)$	คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน
	$K_I \int e(t) dt$	คือ ตัวควบคุมแบบปริพันธ์
	$K_D \frac{d}{dt} e(t)$	คือ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์
	K_p	คือ อัตราขยายของสัดส่วน
	K_I	คือ อัตราขยายของปริพันธ์
	K_D	คือ อัตราขยายของอนุพันธ์

2.4 ระบบควบคุมสมัยใหม่

ระบบพลวัตโดยทั่วไปมีพฤติกรรมที่สามารถนำสมการอนุพันธ์มาใช้ในการอธิบายได้ ขณะเดียวกันสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสูงก็สามารถลดอันดับเป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ ฉะนั้นจึงได้มีการนำเสนอวิธีการใหม่ในการวิเคราะห์และควบคุมระบบพลวัต โดยทำการวิเคราะห์บนโดเมนเวลา และนำแบบจำลองปริภูมิสถานะ (state space model) ที่อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งมาใช้งาน จากสมการปริภูมิสถานะสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหลายอินพุตและหลายเอาต์พุตได้ (multi-input, multi-output, MIMO) ด้วยการกำหนดมิติของตัวแปรสถานะให้มีความเหมาะสมกับระบบพลวัตนั้น ๆ อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับระบบที่มีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว รวมถึงระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือแปรเปลี่ยนตามเวลาได้

2.4.1 แบบจำลองปริภูมิสถานะและฟังก์ชันถ่ายโอน

การออกแบบและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองปริภูมิสถานะ ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตหนึ่งในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งจำนวน n สมการ หรือเท่ากับจำนวนของตัวแปรสถานะ เมื่อพิจารณากระบวนเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ดังแผนภาพบล็อกที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพบล็อกกระบวนเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา

จากรูปที่ 2.10 ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลามีตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

ตัวแปรด้านอินพุตมีจำนวน r ตัวแปร คือ u_1, u_2, \dots, u_r

ตัวแปรด้านเอาต์พุตมีจำนวน m ตัวแปร คือ y_1, y_2, \dots, y_m

ตัวแปรสถานะมีจำนวน n ตัวแปร คือ x_1, x_2, \dots, x_n

ระบบพลวัตนี้สามารถอธิบายได้ด้วยระบบสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งจำนวน n สมการ ดังสมการที่ (2-5)

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + \dots + b_{1r}u_r \\
\dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 + \dots + b_{2r}u_r \\
&\vdots \\
\dot{x}_n &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + b_{n2}u_2 + \dots + b_{nr}u_r
\end{aligned} \tag{2-5}$$

และระบบมีสมการด้านเอาต์พุตของระบบ ได้ดังสมการที่ (2-6)

$$\begin{aligned}
y_1 &= c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1n}x_n + d_{11}u_1 + d_{12}u_2 + \dots + d_{1r}u_r \\
y_2 &= c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots + c_{2n}x_n + d_{21}u_1 + d_{22}u_2 + \dots + d_{2r}u_r \\
&\vdots \\
y_m &= c_{m1}x_1 + c_{m2}x_2 + \dots + c_{mn}x_n + d_{m1}u_1 + d_{m2}u_2 + \dots + d_{mr}u_r
\end{aligned} \tag{2-6}$$

จากสมการที่ (2-5) และสมการที่ (2-6) เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปของสมการปริภูมิสถานะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\
\mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t)
\end{aligned} \tag{2-7}$$

- โดยที่
- $\mathbf{x}(t)$ คือ เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ (state vector) มีอันดับ n
 - $\mathbf{u}(t)$ คือ เวกเตอร์ควบคุม (control vector) มีอันดับ r
 - $\mathbf{y}(t)$ คือ เวกเตอร์เอาต์พุต (output vector) มีอันดับ m
 - \mathbf{A} คือ เมทริกซ์ของตัวแปรสถานะ (state matrix) มีอันดับ $n \times n$
 - \mathbf{B} คือ เมทริกซ์อินพุต (input matrix) มีอันดับ $n \times r$
 - \mathbf{C} คือ เมทริกซ์เอาต์พุต (output matrix) มีอันดับ $m \times n$
 - \mathbf{D} คือ เมทริกซ์การส่งผ่าน (transmission matrix) มีอันดับ $m \times r$

จากสมการที่ (2-7) เมทริกซ์และเวกเตอร์ต่าง ๆ มีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}; \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix}; \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1r} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nr} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1r} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mr} \end{bmatrix}$$

ระบบพลวัตหนึ่ง ๆ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการปริภูมิสถานะได้ ดังเช่น ถ้าหากทราบสมการปริภูมิสถานะจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ เมื่อเราพิจารณาระบบที่มีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว และมีสมการปริภูมิสถานะดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}u(t) \end{aligned} \quad (2-8)$$

ดำเนินการทำการแปลงลาปลาซให้กับสมการที่ (2-8) และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบเป็นศูนย์ $\mathbf{x}(0) = 0$ จะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(s) &= (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}U(s) \\ Y(s) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(s) + \mathbf{D}U(s) \end{aligned}$$

จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2-9)$$

เมื่อพิจารณาระบบพลวัตที่มีหลายอินพุตและหลายเอาต์พุตที่มีสมการปริภูมิสถานะ ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}u(t) \end{aligned} \quad (2-10)$$

ดำเนินการแปลงลาปลาซให้กับสมการที่ (2-10) และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบเป็นศูนย์ $\mathbf{x}(0) = 0$ จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบพลวัตที่มีหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต ดังนี้

$$\frac{\mathbf{Y}(s)}{\mathbf{U}(s)} = \mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2-11)$$

ถ้าหากระบบพลวัตหนึ่ง ๆ มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \cdots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + \cdots + a_1s + a_0} \quad (2-12)$$

โดยระบบพลวัตที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (2-12) จะมีสมการปริภูมิสถานะที่เขียนอยู่ในรูปแบบบัญญัติควบคุมได้ (controllable canonical form) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_{n-2} \quad b_{n-1}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

และระบบพลวัตที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (2-12) จะมีสมการปริภูมิสถานะที่เขียนอยู่ในรูปแบบบัญญัติสังเกตได้ (observable canonical form) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -a_2 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

2.4.2 สภาพควบคุมได้และสภาพสังเกตได้

การออกแบบระบบควบคุมด้วยแบบจำลองปริภูมิสถานะให้กับระบบพลวัต ผู้ออกแบบมีความจำเป็นต้องทราบว่าระบบพลวัตนั้นสามารถควบคุมได้และสามารถสังเกตได้หรือไม่ เพราะเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากก่อนที่จะลงมือทำการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งควรต้องทราบว่าระบบพลวัตนั้นสามารถควบคุมได้และสามารถสังเกตได้เสียก่อน

สภาพควบคุมได้ (controllability)

ระบบพลวัตหนึ่งจะมีสภาพควบคุมได้ถ้าหากสามารถสร้างสัญญาณควบคุมที่ไม่มีข้อจำกัด และทำให้ระบบพลวัตดังกล่าวย้ายจากสถานะเริ่มต้น $\mathbf{x}(t_0)$ ไปยังสถานะใด ๆ ได้ในช่วงเวลาที่จำกัด เมื่อพิจารณาในระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (2-15)$$

โดยที่	$\mathbf{x}(t)$	คือ เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ มีอันดับ n
	$\mathbf{u}(t)$	คือ เวกเตอร์ควบคุม มีอันดับ r
	\mathbf{A}	คือ เมทริกซ์ของตัวแปรสถานะ มีอันดับ $n \times n$
	\mathbf{B}	คือ เมทริกซ์อินพุต มีอันดับ $n \times r$

จากสมการที่ (2-15) ระบบพลวัตจะมีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ \mathbf{M} ที่มีอันดับ $n \times nr$ จะต้องมีค่าลำดับชั้น (rank) เท่ากับ n และเมทริกซ์ \mathbf{M} แสดงได้ดังสมการที่ (2-16)

$$\mathbf{M} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \cdots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}] \quad (2-16)$$

เมทริกซ์ \mathbf{M} คือเมทริกซ์สภาพควบคุมได้ โดยระบบพลวัตจะมีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์มีเงื่อนไขว่าเมทริกซ์ \mathbf{M} จะต้องมีค่าลำดับชั้นเท่ากับจำนวนตัวแปรสถานะ ทั้งนี้ การตรวจสอบค่าลำดับชั้นทำได้ด้วยการหาค่ากำหนด (determinant) ของเมทริกซ์ \mathbf{M} ถ้าค่ากำหนดมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าค่าลำดับชั้นมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรสถานะ จะทำให้ระบบพลวัตดังกล่าวมีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์

สภาพสังเกตได้ (observability)

ระบบพลวัตหนึ่งจะมีสภาพสังเกตได้ถ้าหากสามารถกำหนดสถานะเริ่มต้น $\mathbf{x}(t_0)$ ได้จากการสังเกตสัญญาณเอาต์พุตของระบบ $\mathbf{y}(t)$ ในช่วงเวลาที่จำกัด เมื่อเราพิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ดังนี้

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (2-17)$$

โดยที่ $\mathbf{y}(t)$ คือ เวกเตอร์เอาต์พุต มีอันดับ m
 \mathbf{C} คือ เมทริกซ์เอาต์พุต มีอันดับ $m \times n$
 \mathbf{D} คือ เมทริกซ์การส่งผ่าน มีอันดับ $m \times r$

จากสมการที่ (2-17) ระบบพลวัตจะมีสภาพสภาพสังเกตได้อย่างสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ \mathbf{N} ที่มีอันดับ $nm \times n$ จะต้องมีค่าลำดับชั้นเท่ากับ n และเมทริกซ์ \mathbf{N} แสดงได้ดังสมการที่ (2-18)

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

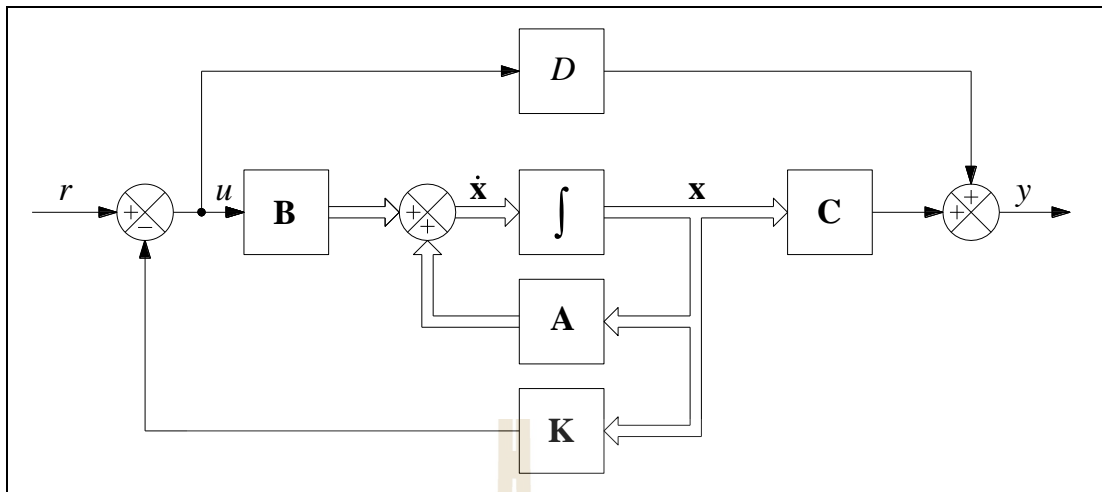
เมทริกซ์ \mathbf{N} คือเมทริกซ์สภาพสังเกตได้ โดยระบบพลวัตจะมีสภาพสังเกตได้อย่างสมบูรณ์ มีเงื่อนไขว่าเมทริกซ์ \mathbf{N} จะต้องมีค่าลำดับชั้นเท่ากับจำนวนตัวแปรสถานะ ถ้าค่ากำหนดของเมทริกซ์ \mathbf{N} มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าค่าลำดับชั้นมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรสถานะ จะทำให้ระบบพลวัตดังกล่าวมีสภาพสังเกตได้อย่างสมบูรณ์ (Ogata, 2010 และ Richard, 2011)

2.4.3 การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล

การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล (pole placement method) จะใช้ได้กับระบบที่มีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าหากสามารถวัดค่าตัวแปรสถานะและทำการป้อนกลับสถานะได้ทั้งหมด จะสามารถวางตำแหน่งโพลวงปิดในตำแหน่งที่ต้องการได้ เมื่อพิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และระบบมีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (2-19)$$

โดยแผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการป้อนกลับสถานะผ่านเมทริกซ์ \mathbf{K} ไปยังสัญญาณควบคุม u โดยเมทริกซ์ \mathbf{K} มีอันดับ $1 \times n$ เป็นเมทริกซ์อัตราขยายป้อนกลับสถานะ (state feedback gain matrix) เมื่อทำการปรับค่าอัตราขยายป้อนกลับสถานะให้มีความเหมาะสมแล้ว จะทำให้ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบมีค่าตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้



รูปที่ 2.11 แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

การออกแบบเมทริกซ์ \mathbf{K} เพื่อวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบลงบนระนาบเชิงซ้อนตามค่าที่กำหนดไว้ โดยตำแหน่งโพลวงปิดจะเป็นอิสระจากอินพุตอ้างอิง r และสัญญาณควบคุม u แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (2-20)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2-20) ลงในสมการที่ (2-19) จะได้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) \quad (2-21)$$

ระบบพลวัตที่มีการป้อนกลับสถานะดังในสมการที่ (2-21) จะมีสมการลักษณะเฉพาะได้ดังนี้

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = 0 \quad (2-22)$$

โดยรากของสมการลักษณะเฉพาะก็คือตำแหน่งโพลวงปิดของระบบนั่นเอง และถ้าหากต้องการกำหนดตำแหน่งโพลวงปิดของระบบไว้ที่ $-\lambda_1, -\lambda_2, \dots, -\lambda_n$ เพราะฉะนั้นระบบพลวัตดังกล่าวจะมีสมการลักษณะเฉพาะได้ดังนี้

$$(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \cdots (s + \lambda_n) = 0 \quad (2-23)$$

เนื่องจากรากของสมการลักษณะเฉพาะในสมการที่ (2-22) คือตำแหน่งโพลวงปิดของระบบหลังจากที่ได้ทำการป้อนกลับสถานะผ่านเมทริกซ์ \mathbf{K} แล้ว และรากของสมการลักษณะเฉพาะในสมการที่ (2-23) คือตำแหน่งโพลวงปิดของระบบที่ต้องการกำหนดไว้ เพราะฉะนั้นโพลวงปิดของระบบจะอยู่ที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (2-24) เมื่อระบบพลวัตมีอันดับ $n \leq 3$ การแทนค่าโดยตรงเพื่อหาค่าเมทริกซ์ \mathbf{K} จะทำได้ค่อนข้างง่าย ทั้งนี้ ระบบพลวัตจะต้องมีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์เท่านั้น

$$|\mathbf{sI} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = (s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \cdots (s + \lambda_n) \quad (2-24)$$

นอกจากนี้ยังมีวิธีการหาค่าเมทริกซ์ \mathbf{K} ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยการใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's formula) เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะดังสมการที่ (2-24)

$$|\mathbf{sI} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = (s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \cdots (s + \lambda_n) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \cdots + d_1s + d_0$$

$$\text{กำหนดให้ } \phi(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \cdots + d_1s + d_0$$

เพราะฉะนั้นเมทริกซ์ \mathbf{K} หาได้จากสูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ogata, 2010 และ Richard, 2011)

$$\mathbf{K} = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1] \mathbf{M}^{-1} \phi(\mathbf{A}) \quad (2-25)$$

โดยที่ \mathbf{K} คือ เมทริกซ์ค่าอัตราขยายป้อนกลับสถานะ

\mathbf{M}^{-1} คือ อินเวอร์สของเมทริกซ์สภาพควบคุมได้

$$\phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + d_{n-1}\mathbf{A}^{n-1} + \cdots + d_1\mathbf{A} + d_0\mathbf{I}$$

2.4.4 การออกแบบตัวสังเกตสถานะ

การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล และใช้การป้อนกลับสถานะผ่านค่าอัตราขยายป้อนกลับสถานะที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะใช้ได้กับระบบที่สามารถตรวจวัดค่าตัวแปรสถานะได้ทุกตัว แต่ในบางกรณีไม่สามารถตรวจวัดค่าตัวแปรสถานะได้อันเนื่องจากตัวแปรไม่ใช่ปริมาณทางกายภาพ หรือไม่ต้องการตรวจวัดค่าตัวแปรสถานะ เพราะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อตัวตรวจรู้และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เพราะฉะนั้นจึงได้นำวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะเข้ามาช่วย โดยวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะจะเป็นการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขึ้นมา เพื่อใช้ประมาณค่าตัวแปรสถานะให้ใกล้เคียง

กับค่าจริงมากที่สุด จากนั้นทำการป้อนกลับผ่านค่าอัตราขยายป้อนกลับสถานะ เราเรียกวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะนี้ว่า ตัวสังเกตสถานะ (state observer) ในกรณีที่ประมาณค่าตัวแปรสถานะทุกตัว เราเรียกตัวสังเกตนี้ว่า ตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ (full-order state observer)

เมื่อพิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาและมีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\tag{2-26}$$

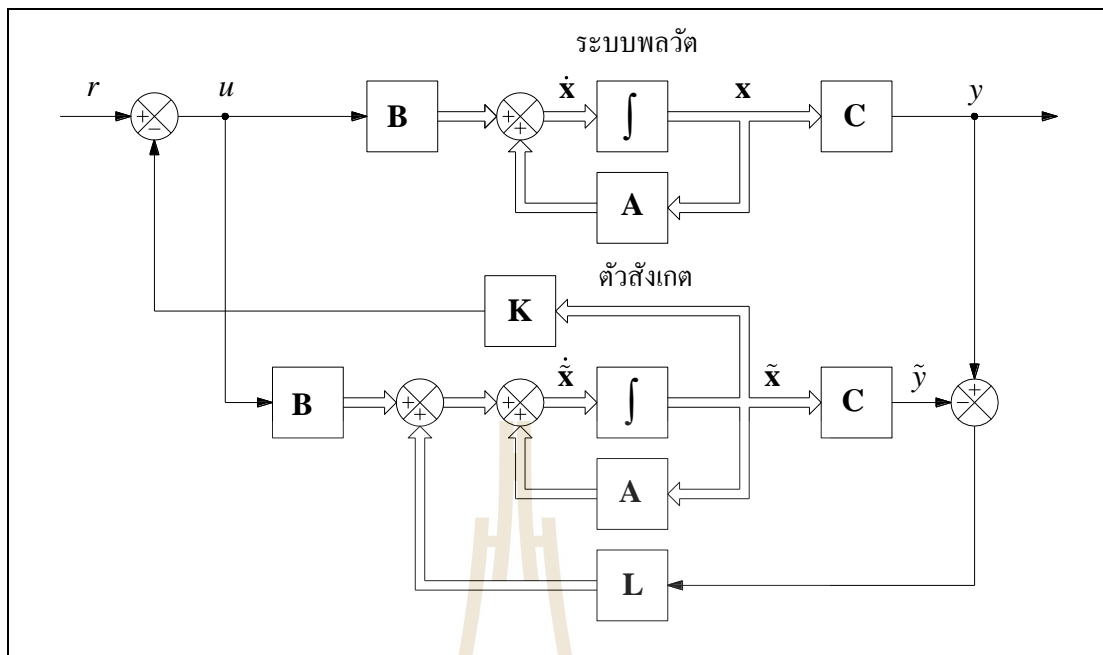
แบบจำลองของตัวสังเกตจะใช้ $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ เป็นค่าประมาณของเวกเตอร์สถานะ $\mathbf{x}(t)$ โดยสมการของตัวสังเกตจะเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ \tilde{y}(t) &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(t)\end{aligned}\tag{2-27}$$

เมื่อนำสมการที่ (2-27) ลบออกจากสมการที่ (2-26) จะได้

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)) \\ y(t) - \tilde{y}(t) &= \mathbf{C}(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t))\end{aligned}\tag{2-28}$$

เมื่อตัวสังเกตถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดีแล้วค่าแตกต่างของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และผลตอบสนองชั่วคราวของตัวสังเกตจะใช้เวลาเช่นเดียวกันกับระบบจริง การออกแบบตัวสังเกตจะอยู่บนพื้นฐานของระบบพลวัตจริง โดยจะเพิ่มพจน์ค่าผิดพลาดการประมาณค่า (estimation error) เข้าไปชดเชยความไม่ถูกต้องของเมทริกซ์ \mathbf{A} และ \mathbf{B} ทั้งนี้ค่าผิดพลาดการประมาณค่าเป็นผลต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการวัด $y(t)$ กับเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการประมาณค่า $\tilde{y}(t)$ แล้วทำการป้อนกลับผ่านเมทริกซ์ค่าอัตราขยายตัวสังเกต \mathbf{L} (observer gain matrix) โดยแผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าค่าแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสอง $y(t) - \tilde{y}(t)$ จะถูกป้อนกลับผ่านเมทริกซ์ \mathbf{L} และเมื่อดำเนินการออกแบบเมทริกซ์ \mathbf{L} ที่มีความถูกต้องและเหมาะสมแล้ว จะทำให้ผลตอบสนองชั่วคราวของตัวสังเกตมีความรวดเร็วกว่าผลตอบสนองชั่วคราวของระบบพลวัตจริงได้



รูปที่ 2.12 แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับ
ตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

จากรูปที่ 2.12 สามารถเขียนสมการของตัวสังเกตได้ดังนี้

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}(\mathbf{C}\mathbf{x}(t) - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(t)) \quad (2-29)$$

เมื่อนำสมการที่ (2-26) ลบออกด้วยสมการที่ (2-29) จะได้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)) \quad (2-30)$$

กำหนดให้ค่าผิดพลาดของเวกเตอร์สถานะเท่ากับ $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)$ เพราะฉะนั้นสมการที่ (2-30) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการค่าผิดพลาด ดังนี้

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\mathbf{e}(t) \quad (2-31)$$

ถ้าเมทริกซ์ $\mathbf{A} - \mathbf{LC}$ มีเสถียรภาพหรือค่าเฉพาะ (eigenvalue) ทั้งหมดมีส่วนจริงที่เป็นจำนวนลบ เวกเตอร์ $\mathbf{e}(t)$ จะมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์ และสมการลักษณะเฉพาะของตัวสังเกตจะหาได้ดังนี้

$$|s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})| = 0 \quad (2-32)$$

โดยทั่วไปควรเลือกค่าเจาะจงของตัวสังเกตที่จะทำให้ผลตอบสนองชั่วคราวของตัวสังเกตมีความรวดเร็วกว่าผลตอบสนองชั่วคราวของระบบพลวัตจริงประมาณ 10 เท่า หรือมากกว่า และถ้าหากต้องการกำหนดตำแหน่งค่าเจาะจงของตัวสังเกตไว้ที่ $-\mu_1, -\mu_2, \dots, -\mu_n$ เพราะฉะนั้นตัวสังเกตจะมีสมการลักษณะเฉพาะได้ดังนี้

$$(s + \mu_1)(s + \mu_2) \cdots (s + \mu_n) = 0 \quad (2-33)$$

เมทริกซ์ค่าอัตราขยายตัวสังเกต \mathbf{L} จะสามารถหาได้ดังนี้

$$|s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})| = (s + \mu_1)(s + \mu_2) \cdots (s + \mu_n) \quad (2-34)$$

ดังนั้นระบบพลวัตที่จะสามารถใช้วิธีออกแบบตัวสังเกตได้ จะต้องมีสภาพสังเกตได้อย่างสมบูรณ์เท่านั้น และสมการสถานะของตัวสังเกตจะแสดงได้ดังสมการที่ (2-35)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}y(t) \quad (2-35)$$

การออกแบบเมทริกซ์ \mathbf{K} และเมทริกซ์ \mathbf{L} ของการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะ จะใช้ทฤษฎีการแบ่งแยก (separation principle) ในการออกแบบเมทริกซ์ที่ละตัวด้วยวิธีวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบ แล้วจึงนำมาใช้งานร่วมกัน ถ้าหากระบบพลวัตมีอันดับเท่ากับ n แล้ว ตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับจะมีอันดับเท่ากับ n เช่นกัน และการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ จะมีอันดับเท่ากับ $2n$

การหาค่าอัตราขยายตัวสังเกตที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะจะได้

$$|s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})| = (s + \mu_1)(s + \mu_2) \cdots (s + \mu_n) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \cdots + d_1s + d_0$$

$$\text{กำหนดให้ } \phi(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \cdots + d_1s + d_0$$

เพราะฉะนั้นเมทริกซ์ \mathbf{L} หาได้จากสูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ogata, 2010 และ Richard, 2011)

$$\mathbf{L} = \phi(\mathbf{A})\mathbf{N}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

โดยที่ \mathbf{L} คือ เมทริกซ์ค่าอัตราขยายตัวสังเกต
 \mathbf{N}^{-1} คือ อินเวอร์สเมทริกซ์สภาพสังเกตได้
 $\phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + d_{n-1}\mathbf{A}^{n-1} + \dots + d_1\mathbf{A} + d_0\mathbf{I}$

2.5 การทำให้เป็นเชิงเส้น

ระบบทางวิศวกรรมทั่วไปโดยธรรมชาติแล้วจะเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear system) แต่เราสามารถประมาณระบบนั้นให้เป็นระบบเชิงเส้นได้ (linear system) ในช่วงการทำงานหนึ่ง ๆ โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) เข้าไปแทนฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น การกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์นั้นจะดำเนินการรอบจุดที่ระบบทำงาน โดยพจน์อันดับสูงจากการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์จะสามารถถูกละทิ้งได้ เช่น กำหนดให้ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น และกำลังทำงานอยู่ที่จุด x_0 เราสามารถใช้อนุกรมเทย์เลอร์เข้าไปแทนฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (2-37)

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x-x_0)^n \\ &= f(x_0) + f'(x_0)(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!} (x-x_0)^2 + \frac{f'''(x_0)}{3!} (x-x_0)^3 + \dots \end{aligned} \quad (2-37)$$

จากสมการที่ (2-37) ถ้าค่า x มีค่าใกล้เคียงกันมากกับค่า x_0 จะทำให้ $x-x_0$ มีค่าน้อยมาก เพราะฉะนั้นสามารถละทิ้งพจน์ที่มีอันดับสูงกว่าหนึ่งได้ เนื่องจากค่าน้อยยกกำลังแล้วยังได้ค่าที่น้อยลงไปอีก ดังนั้นการประมาณฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นจะได้ดังนี้

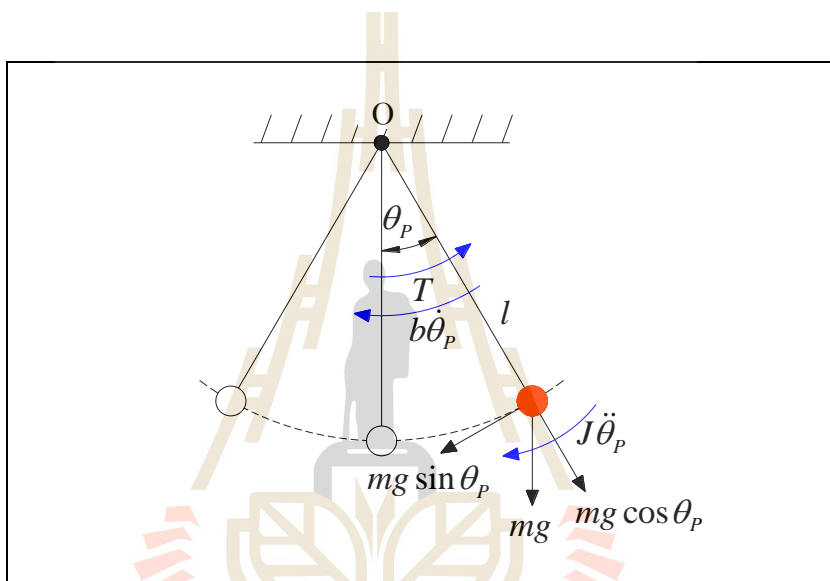
$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x-x_0) \quad (2-38)$$

เมื่อพิจารณาแผนภาพการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าลูกตุ้มนาฬิกามีมวลเท่ากับ m ติดอยู่ที่ปลายก้านความยาว l และก้านถูกยึดติดไว้ที่จุด O การแกว่งของ

ลูกตุ้มนาฬิกาจะมีความเฉื่อยรอบจุดหมุน $J = ml^2$ เพราะฉะนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา ดังนี้

$$ml^2 \ddot{\theta}_p + b\dot{\theta}_p + mgl \sin \theta_p = T \quad (2-39)$$

จะเห็นได้ว่ามีพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ $mgl \sin \theta_p$ โดยสามารถทำพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นได้ด้วยการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์แทนที่พจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.13 แผนภาพการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา

กำหนดให้ $\tau = mgl \sin \theta_p$ จากความสัมพันธ์ของการประมาณฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (2-40) เมื่อพิจารณาค่ามุม θ_{p0} ให้เป็นจุดทำงาน เพราะฉะนั้นการประมาณพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau &= mgl \sin \theta_{p0} + \frac{d}{d\theta_{p0}} mgl \sin \theta_{p0} (\theta_p - \theta_{p0}) \\ &= mgl \sin \theta_{p0} + mgl \cos \theta_{p0} (\theta_p - \theta_{p0}) \end{aligned} \quad (2-40)$$

เมื่อพิจารณามุมการแกว่ง θ_p ที่มีค่าน้อย ๆ และให้จุดทำงานที่ θ_{p0} เป็นตำแหน่งค่ามุม 0 เรเดียน จากสมการที่ (2-40) จะได้การประมาณพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$\tau = mgl\theta_p \quad (2-41)$$

ดังนั้น จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกาที่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$ml^2\ddot{\theta}_p + b\dot{\theta}_p + mgl\theta_p = T \quad (2-42)$$

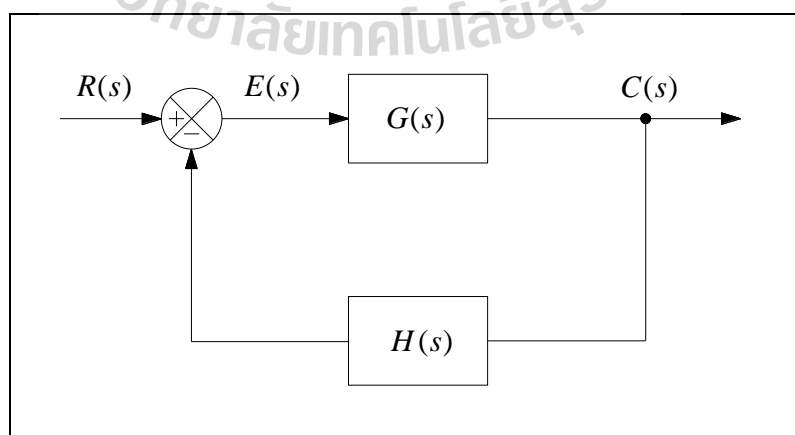
จากสมการที่ (2-39) เป็นสมการไม่เชิงเส้น และสมการที่ (2-42) เป็นสมการเชิงเส้น จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกาที่ค่ามุมน้อย ๆ จะสามารถประมาณพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นได้ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ หรือใช้อนุกรมเทย์เลอร์ประมาณค่ามุมน้อย ๆ ให้เป็นเชิงเส้นได้ ดังเช่น $\sin \theta_p \approx \theta_p$ ขณะเดียวกันก็ใช้อนุกรมเทย์เลอร์ประมาณค่ามุมน้อย ๆ $\cos \theta_p \approx 1$ ได้เช่นเดียวกัน (สุจิตจร, 2546, แสงวีระพันธุ์ศิริ, 2556 และ Norman, 2011)

2.6 ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

พิจารณาแผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาด $E(s)$ คือค่าแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุต $R(s)$ กับเอาต์พุต $C(s)$ โดยมีสัญญาณป้อนกลับ $H(s)$ และระบบพลวัตมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s)$ เพราะฉะนั้นค่าผิดพลาดจะหาได้จากสมการที่ (2-43) ในกรณีที่ระบบมีการป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย จะได้สมการที่ (2-44)

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad (2-43)$$

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (2-44)$$



รูปที่ 2.14 แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบป้อนกลับ

และพิจารณาระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย จะได้ค่าผิดพลาดดังนี้

$$E(s) = R(s) - C(s) = R(s) - G(s)E(s) = \frac{R(s)}{1+G(s)} \quad (2-45)$$

การหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady state error) ของระบบในโดเมนเวลาจะพิจารณาเมื่อเวลาเข้าสู่อนันต์ และการหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวในโดเมนความถี่เชิงซ้อน โดยใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้าย (final value theorem) จากค่าผิดพลาดในสมการที่ 2-45 จะหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้ดังนี้ (วิชัชชัย, 2545, Ogata, 2010 และ Richard, 2011)

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)} \quad (2-46)$$

การใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้ายเพื่อหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของระบบนั้น โพลทั้งหมดของฟังก์ชัน $E(s)$ จะต้องอยู่ทางด้านซ้ายของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อนเท่านั้น ถ้าหากมีโพลอยู่ทางด้านขวาของแกนจินตภาพหรืออยู่บนแกนจินตภาพแล้ว จะไม่สามารถใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้ายเพื่อหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้ อันเนื่องจากระบบดังกล่าวไม่มีเสถียรภาพอยู่แล้ว

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบพลวัตที่อยู่ในรูปแบบดังสมการที่ (2-47) ค่าตัวแปร N จะเป็นตัวกำหนดประเภทของระบบ (system type) และอันดับของระบบถูกกำหนดด้วยกำลังสูงสุดของตัวแปร s ในพหุนามตัวส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนนั้น

$$G(s) = \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{s^N(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_n)} \quad (2-47)$$

จากสมการที่ (2-46) เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย จะได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวดังต่อไปนี้

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1+G(s)} = \frac{1}{1+G(0)}$$

กำหนดให้ค่าคงที่ความผิดพลาดของตำแหน่ง (position error constant) คือ K_p ดังนี้

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = G(0)$$

ดังนั้นจะได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย ดังนี้

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p} \quad (2-48)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบดังสมการที่ (2-47) กรณีระบบเป็นประเภทที่ 0 จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นค่าคงที่ ถ้าระบบเป็นประเภทที่ 1 ขึ้นไป จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเป็นค่าอนันต์ ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์

จากสมการที่ (2-46) เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียงหนึ่งหน่วย จะได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวดังต่อไปนี้

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1/s}{1 + G(s)} = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} sG(s)}$$

กำหนดให้ค่าคงที่ความผิดพลาดของความเร็ว (velocity error constant) คือ K_v ดังนี้

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)$$

ดังนั้นจะได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียงหนึ่งหน่วย ดังนี้

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} \quad (2-49)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบดังสมการที่ (2-47) กรณีระบบเป็นประเภทที่ 0 จะมีค่าความผิดพลาดของความเร็วเป็นศูนย์ ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นค่าอนันต์ ถ้าระบบเป็นประเภทที่ 1 จะมีค่าความผิดพลาดของความเร็วเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าคงที่ ถ้าระบบเป็นประเภทที่ 2 ขึ้นไป จะมีค่าความผิดพลาดของความเร็วเป็นค่าอนันต์ ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์

จากสมการที่ (2-46) เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบพาราโบลาหนึ่งหน่วย ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวจะได้ดังต่อไปนี้

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1/s^2}{1+G(s)} = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)}$$

กำหนดให้ค่าคงที่ความผิดพลาดของความเร่ง (accelerator error constant) คือ K_a ดังนี้

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)$$

ดังนั้นจะได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบพาราโบลาหนึ่งหน่วย ดังนี้

$$e_{ss} = \frac{1}{K_a} \quad (2-50)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบดังสมการที่ (2-47) กรณีระบบเป็นประเภทที่ 0 หรือระบบเป็นประเภทที่ 1 จะมีค่าความผิดพลาดของความเร่งเป็นศูนย์ ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นค่าอนันต์ ถ้าระบบเป็นประเภทที่ 2 จะมีค่าความผิดพลาดของความเร่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าคงที่ ถ้าระบบเป็นประเภทที่ 3 ขึ้นไป จะมีค่าความผิดพลาดของความเร่งเป็นค่าอนันต์ ทำให้ได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบ และค่าผิดพลาดหาได้ดังต่อไปนี้

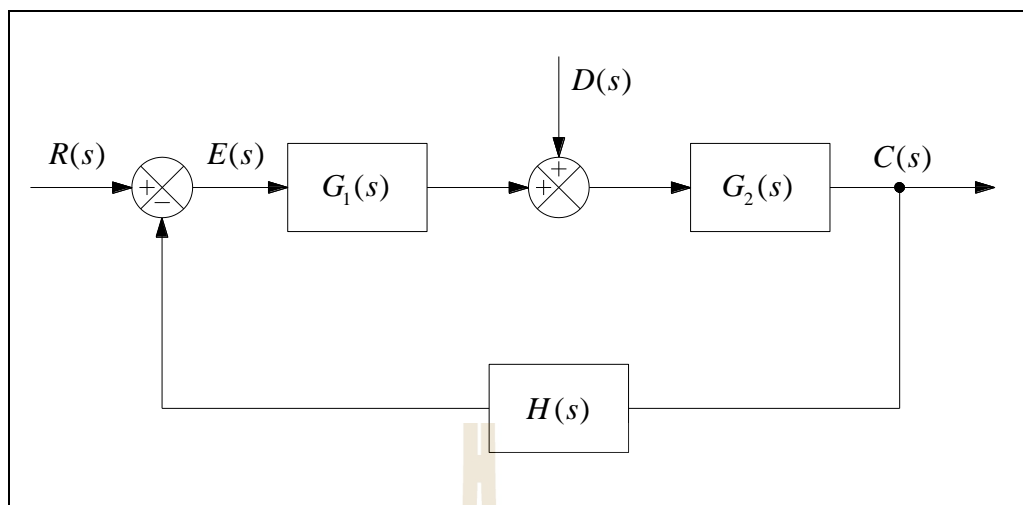
$$E(s) = R(s) - C(s) = R(s) - T(s)R(s) = R(s)(1 - T(s)) \quad (2-51)$$

กำหนดให้ $T(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบ ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวจะมีค่าดังนี้

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sR(s)(1 - T(s)) \quad (2-52)$$

เมื่อพิจารณาระบบป้อนกลับที่มีการรบกวนเข้ามาในระบบ ดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าการรบกวนเข้ามาในระบบคือ $D(s)$ และมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้ เช่นเดียวกันกับสัญญาณอินพุตคือ $R(s)$ และสัญญาณเอาต์พุตของระบบคือ $C(s)$ มีค่าได้ดังนี้

$$C(s) = (G_1(s)E(s) + D(s))G_2(s) \quad (2-53)$$



รูปที่ 2.15 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีการรบกวนเข้ามาในระบบ

เนื่องจาก $E(s) = R(s) - H(s)C(s)$ เมื่อแทนในสมการที่ (2-45) จะได้ดังต่อไปนี้

$$C(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} R(s) + \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} D(s) \quad (2-54)$$

ในกรณีที่ระบบมีการป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วยคือ $H(s) = 1$ ค่าผิดพลาดจะได้ดังนี้

$$E(s) = R(s) - C(s) = \left(1 - \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)}\right) R(s) - \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} D(s) \quad (2-55)$$

การหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของระบบที่มีสัญญาณอินพุตคือ $R(s)$ และสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบคือ $D(s)$ โดยใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้ายดังสมการที่ (2-46) จะได้ดังนี้

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(1 - \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)}\right) R(s) - \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} D(s) \quad (2-56)$$

2.7 เสถียรภาพของระบบ

การมีเสถียรภาพของระบบเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญมาก เมื่อระบบควบคุมหนึ่งไม่มีเสถียรภาพแล้วก็ไม่อาจจะใช้ประโยชน์จากระบบควบคุมดังกล่าวได้ พิจารณาระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา โดยระบบจะมีเสถียรภาพถ้าหากเอาต์พุตของระบบกลับคืนสู่สถานะสมดุลได้หลังจากที่มีการรบกวนเกิดขึ้นในระบบ และระบบจะไม่มีเสถียรภาพถ้าหากเอาต์พุตของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีการขอบเขตจากสถานะสมดุล หรือมีลักษณะแกว่งตัวอยู่ตลอดเวลาหลังจากที่มีการรบกวนเกิดขึ้นในระบบ

การศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบควบคุม จะทำการศึกษาระบบควบคุมนั้นมีเสถียรภาพหรือไม่มีเสถียรภาพ เราเรียกว่าการศึกษาเสถียรภาพสัมบูรณ์ (absolute stability) และจะทำการศึกษาระบบควบคุมนั้นมีเสถียรภาพมากหรือน้อยเพียงใด เราเรียกว่าการศึกษาเสถียรภาพสัมพัทธ์ (relative stability) โดยแนวคิดเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบควบคุมมีอยู่หลายแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบที่จะศึกษา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกถูกจำกัดขอบเขต (bounded-input bounded-output stability, BIBO) และเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์ (zero-input stability)

2.7.1 เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกถูกจำกัดขอบเขต

เสถียรภาพแบบ BIBO มีเงื่อนไขในการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบที่ไม่มีค่าเริ่มต้นในการทำงาน จะพิจารณาว่าเมื่อมีสัญญาณเข้าซึ่งถูกจำกัดขอบเขตป้อนให้แก่ระบบแล้ว จะได้สัญญาณออกมีลักษณะเป็นอย่างไร โดยระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบ BIBO เมื่อทุกสัญญาณเข้าซึ่งถูกจำกัดขอบเขตทำให้สัญญาณออกที่ได้มีลักษณะที่ถูกจำกัดขอบเขตด้วย และในกรณีที่ระบบควบคุมมีสัญญาณเข้าบางสัญญาณซึ่งถูกจำกัดขอบเขตแต่ทำให้สัญญาณออกที่ได้มีลักษณะไม่ถูกจำกัดขอบเขต ระบบดังกล่าวจะไม่มีเสถียรภาพแบบ BIBO ไปด้วย

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมที่มีสัญญาณเข้า $u(t)$ และมีสัญญาณออก $y(t)$ แล้วระบบมีผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตเป็น $h(t)$ จากทฤษฎีบทการประสาน (convolution theorem) จะได้ดังต่อไปนี้

$$y(t) = \int_0^{\infty} u(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad (2-57)$$

$$|y(t)| = \left| \int_0^{\infty} u(t-\tau)h(\tau)d\tau \right| \leq \int_0^{\infty} |u(t-\tau)||h(\tau)|d\tau \quad (2-58)$$

เมื่อสัญญาณเข้า $u(t)$ ถูกจำกัดขอบเขตแล้ว ทำให้ $|u(t)| \leq M_u < \infty$ จากสมการที่ (2-58) จะได้

$$|y(t)| \leq M_u \int_0^{\infty} |h(\tau)| d\tau \quad (2-59)$$

และสัญญาณออก $y(t)$ จะถูกจำกัดขอบเขต ก็ต่อเมื่อ

$$\int_0^{\infty} |h(\tau)| d\tau \leq M_h < \infty \quad (2-60)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2-59) จะได้ $|y(t)| \leq M_u M_h$ และเมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน $H(s)$ ที่เป็นผลจากการแปลงลาปลาซของผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ $h(t)$ ได้ดังนี้

$$H(s) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-st} dt$$

$$|H(s)| = \left| \int_0^{\infty} h(t) e^{-st} dt \right| \leq \int_0^{\infty} |h(t)| |e^{-st}| dt$$

เนื่องจาก $s = \rho \pm j\omega$ โดยที่ตัวแปร σ เป็นส่วนจริงในระนาบเชิงซ้อน และมีค่าเท่ากับโพลของ $H(s)$ เพราะฉะนั้นจะได้

$$\infty \leq \int_0^{\infty} |h(t)| |e^{-\sigma t}| dt$$

ถ้าหากมีตำแหน่งของโพลบางค่าอยู่ด้านขวาของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน หรืออยู่บนแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ค่าของ σ จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้น $|e^{-\sigma t}|$ จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง และจากสมการข้างบนจะทำให้

$$\infty \leq \int_0^{\infty} |h(t)| dt$$

ซึ่งผลที่ได้ดังกล่าวจะให้ความขัดแย้งกับเงื่อนไขเสถียรภาพแบบ BIBO ตามสมการที่ (2-59) ดังนั้นระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบ BIBO ก็ต่อเมื่อรากทั้งหมดของสมการลักษณะเฉพาะต้องอยู่ด้านซ้ายของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อนเท่านั้น ถ้ามีรากของสมการลักษณะเฉพาะบางค่าอยู่บนแกนจินตภาพหรืออยู่ด้านขวาของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ระบบดังกล่าวจะไม่มีเสถียรภาพแบบ BIBO

2.7.2 เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์

เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์มีเงื่อนไขในการศึกษาเสถียรภาพ โดยจะพิจารณาว่าเมื่อสัญญาณเข้ามีค่าเป็นศูนย์แล้ว สัญญาณออกของระบบจะเป็นผลมาจากเงื่อนไขเริ่มต้นเท่านั้น โดยระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์ก็ต่อเมื่อผลตอบสนองของสัญญาณออกมีค่าเข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปจนเข้าสู่อนันต์ ถ้าผลตอบสนองต่อสัญญาณเข้าศูนย์มีค่าไม่เข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปจนเข้าสู่อนันต์ ระบบดังกล่าวจะไม่มีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์ ซึ่งเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์เรียกได้อีกชื่อว่าเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (asymptotic stability) เมื่อพิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาและมีผลตอบสนองต่อสัญญาณเข้าศูนย์ ดังนี้

$$y(t) = \sum_i A_i e^{s_i t} + \sum_j B_j t^n e^{s_j t} \quad (2-61)$$

โดยที่ A_i และ B_j เป็นสัมประสิทธิ์ที่มีค่าคงที่ s_i เป็นรากของสมการลักษณะเฉพาะที่ไม่ซ้ำกัน s_j เป็นรากของสมการลักษณะเฉพาะที่ซ้ำกัน ระบบนี้จะมีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์เมื่อ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t)| = 0 \quad (2-62)$$

จากสมการที่ (2-61) และสมการที่ (2-62) ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์ เมื่อ s_i และ s_j ต้องมีค่าเป็นจำนวนลบ หรือรากทั้งหมดของสมการลักษณะเฉพาะต้องอยู่ด้านซ้ายของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อนเท่านั้น ถ้ามีรากของสมการลักษณะเฉพาะบางค่าอยู่บนแกนจินตภาพหรืออยู่ด้านขวาของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ระบบดังกล่าวจะไม่มีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์ (รัชชัย, 2545)

2.8 สรุป

การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง มีเทคนิคที่ใช้ในการปรับตั้ง ดังนี้ การปรับตั้งด้วยสลักเกลียวและน็อตใช้งานมายาวนาน มีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่พื้นอาคารปฏิบัติการไม่เกิดการทรุดตัวและเคลื่อนตัว การดำเนินงานปรับตั้งในแต่ละครั้งใช้เวลานาน การปรับตั้งด้วยแม่แรงลิ่มร่วมกับสลักเกลียวและน็อต มีการใช้งานมายาวนาน และใช้มอเตอร์เข้ามาช่วยขับเคลื่อนแม่แรงลิ่ม การดำเนินงานปรับตั้งในแต่ละครั้งใช้เวลานานเช่นกัน การปรับตั้งด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง มีการใช้งานมายาวนาน และใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนลูกเบี้ยวให้เกิดการหมุน

การควบคุมการหมุนและเลื่อนที่ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กใช้การเขียนโปรแกรมชุดคำสั่งควบคุม ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญสูง ปัจจุบันมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ใช้เทคนิค การปรับตั้งด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางอยู่หลายแห่ง เพราะการดำเนินงานปรับตั้งในแต่ละครั้งใช้ระยะเวลาสั้น และได้ศึกษาเกี่ยวกับหลักการและวิธีการควบคุมเพื่อใช้ในงานวิจัย ดังนี้ ระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่อาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และระบบ ควบคุมสมัยใหม่ที่อาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะ สภาพควบคุมได้และสภาพสังเกตได้ของระบบ พลวัต การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล การออกแบบตัวสังเกตสถานะ เพื่อใช้ประมาณค่าตัวแปรสถานะ การทำฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น การหาค่าผิดพลาด ในสถานะอยู่ตัว เสถียรภาพของระบบควบคุมทั้งเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออก ถูกจำกัดขอบเขต และเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบ แนวแกน x และการหมุนรอบแนวแกน z เพื่อใช้ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานการปรับตั้ง แม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสง ซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ต้องการ การปรับตั้งจะใช้เทคนิคของลูกเบี้ยววงกลม แบบเยื้องศูนย์กลาง การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง (ลูบควบคุมด้านใน) จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่อาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบพลวัต และ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับที่อาศัยแบบจำลอง ปริภูมิสถานะของระบบพลวัต การควบคุมการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก จะใช้สมการจลนศาสตร์ผกผันเพื่อกำหนดตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้อง ศูนย์กลาง จะใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (ลูบควบคุมด้านนอก) ทั้งนี้ ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กจะ สามารถเคลื่อนไหวได้ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต โดยระบบควบคุม อัตโนมัติจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายไม่ยุ่งยากเหมือนการเขียนโปรแกรมชุดคำสั่ง ควบคุม และจะสามารถประยุกต์ใช้งานได้เมื่อระบบแท่นรองรับแม่เหล็กเพิ่มขีดความสามารถใน การเคลื่อนไหวมากขึ้น

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ

3.1 บทนำ

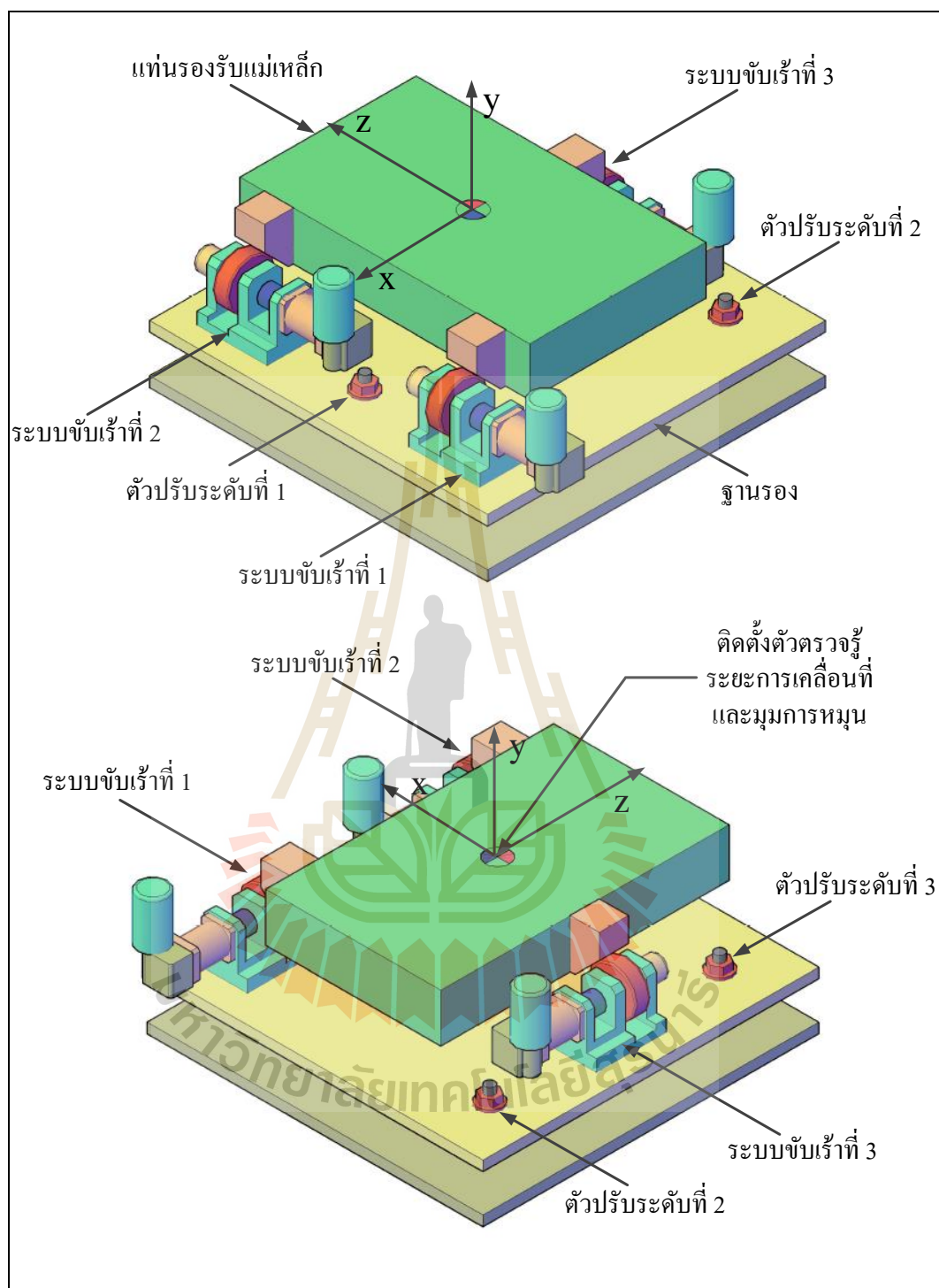
บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z โดยตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจะได้รับการขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางจำนวน 3 ชุด การออกแบบระบบแท่นรองรับแม่เหล็กด้วยการกำหนดมิติและขนาดของโครงสร้างระบบ การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการจลนศาสตร์ และสมการจลนศาสตร์ผกผันของระบบ จำลองสถานการณ์การเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน การออกแบบระบบขับเคลื่อนด้วยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยรวมโมเมนต์ความเฉื่อยและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดของมอเตอร์และชุดเฟืองเข้าด้วยกัน กำหนดให้ระบบขับเคลื่อนสามารถรองรับน้ำหนักได้ประมาณ 100 กิโลกรัม การผลิตชิ้นงานจะดำเนินการที่โรงเครื่องมือกลที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน การประกอบติดตั้งระบบขับเคลื่อนและทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง การประกอบติดตั้งระบบแท่นรองรับแม่เหล็กและทดสอบการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก และสรุป

3.2 การออกแบบระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กเป็นส่วนที่ใช้รองรับการติดตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอน ตัวโครงสร้างของแท่นรองรับต้องมีความมั่นคงและแข็งแรง ไม่ควรเกิดการบิดตัว การหดตัว และเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ระบบขับเคลื่อนที่ใช้ขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนไหวต้องสามารถรองรับน้ำหนักได้ทั้งตัวโครงสร้างของตัวแท่นรองรับ แม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอน การออกแบบจะกำหนดขนาดมิติของตัวโครงสร้างให้เหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้ผลิตชิ้นงาน ทั้งนี้การเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจะใช้ฟีดการใช้งานจริง

3.2.1 มิติและขนาดของตัวโครงสร้าง

ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ได้ ขณะที่การเคลื่อนที่ในแนวแกน x และแนวแกน z การหมุนรอบแนวแกน y จะประมาณให้มีค่าเท่ากับศูนย์ การออกแบบระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การออกแบบระบบแผ่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ

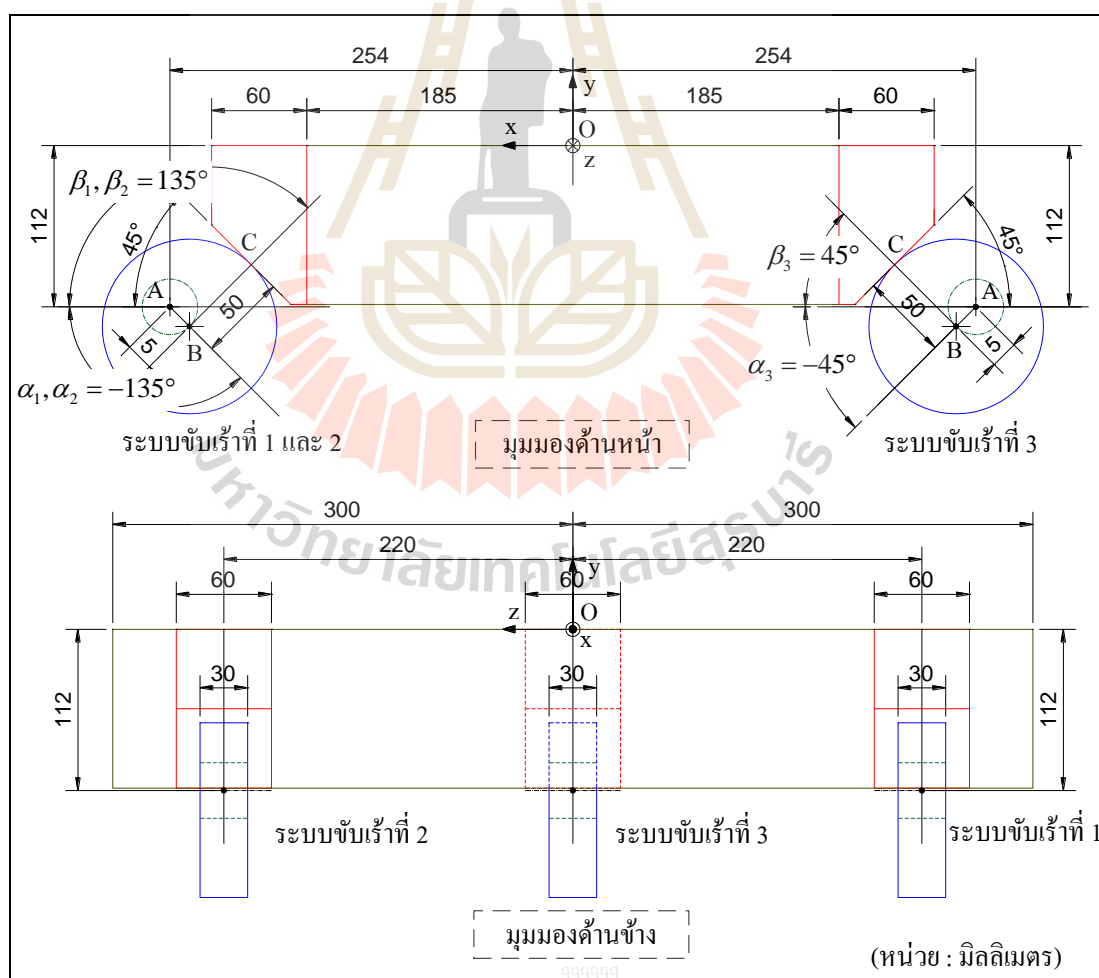
ระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ กำหนดให้ระยะการเคลื่อนที่และมุมการหมุน ดังนี้

การเคลื่อนที่ในแนวแกน y ค่าระยะการเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร

การหมุนรอบแนวแกน x ค่ามุมการหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน

การหมุนรอบแนวแกน z ค่ามุมการหมุน ± 30 มิลลิเรเดียน

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าตัวแท่นรองรับแม่เหล็กถูกขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนไหวได้ด้วยระบบขับเคลื่อนจำนวน 3 ชุด ตรงจุดกึ่งกลางบนตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจะติดตั้งตัวตรวจรู้ระยะการเคลื่อนที่และมุมการหมุน การปรับตั้งฐานรองจะใช้ตัวปรับระดับจำนวน 3 ชุด เพื่อใช้สร้างกรอบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบ ด้วยการทำให้ฐานรองเกิดการทรุดตัวและเอียงตัวขึ้น ซึ่งเป็นการสร้างสถานการณ์คล้ายกับที่พื้นอาคารเกิดการทรุดและเอียงตัว แบบแสดงรายละเอียดมิติและขนาดของตัวโครงสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบแสดงรายละเอียดมิติและขนาดของตัวโครงสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

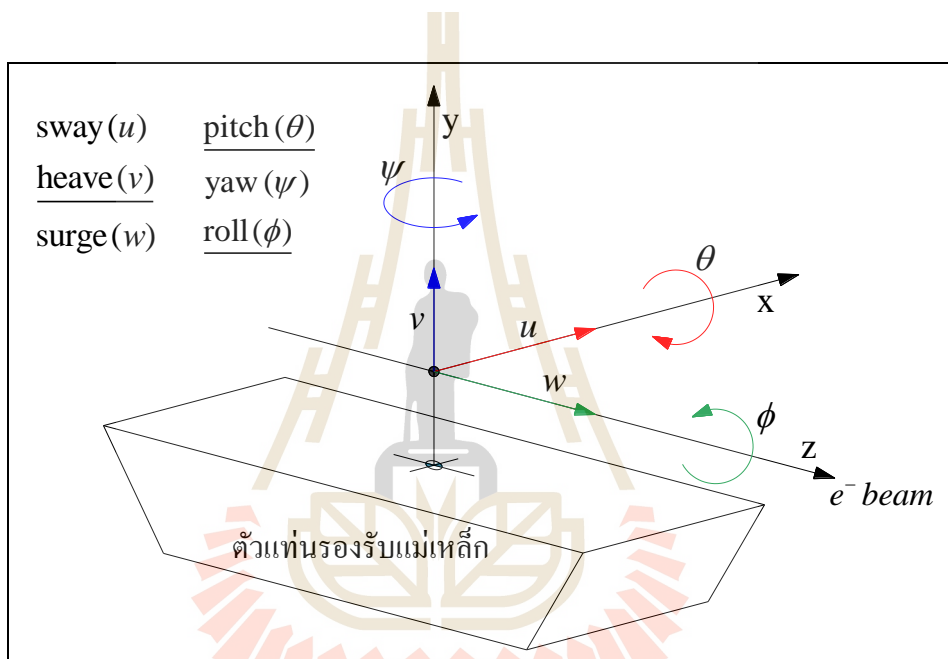
จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าการกำหนดให้จุด A เป็นจุดหมุนของแกนเพลาลูกเบี้ยว จุด B คือจุดศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลมและอยู่ห่างจากจุด A เท่ากับ 5 มิลลิเมตร จุด C เป็นจุดสัมผัสระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับตัวแทนรองรับแม่เหล็ก โดยระบบขับเร้าที่ 1 และ 2 ติดตั้งด้านบวกของแกน x มีค่ามุมในอุดมคติของแนวเอียงศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลม α_1 และ α_2 เท่ากับ -135 องศา และมุมจุดสัมผัสในอุดมคติระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับตัวแทนรองรับแม่เหล็ก β_1 และ β_2 เท่ากับ 135 องศา ส่วนระบบขับเร้าที่ 3 ติดตั้งด้านลบของแกน x มีมุมในอุดมคติของแนวเอียงศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลม α_3 เท่ากับ -45 องศา และมุมจุดสัมผัสในอุดมคติระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับตัวแทนรองรับแม่เหล็ก β_3 เท่ากับ 45 องศา โดยออกแบบให้หน้าสัมผัสของตัวแทนรองรับแม่เหล็กเอียงทำมุมไว้ 45 องศา ระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3 จะสามารถหมุนด้วยค่ามุม α รอบแนวเอียงศูนย์กลางในอุดมคติได้อยู่ในช่วง ± 90 องศา รายละเอียดแสดงมิติและขนาดของตัวโครงสร้างระบบแทนรองรับแม่เหล็ก แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดมิติและขนาดของตัวโครงสร้างระบบแทนรองรับแม่เหล็ก

รายละเอียด	ระบบขับเร้าที่ 1	ระบบขับเร้าที่ 2	ระบบขับเร้าที่ 3
ตำแหน่งจุดหมุนแกนเพลาลูกเบี้ยวในแนวแกน x m_x (มิลลิเมตร)	254	254	-254
ตำแหน่งจุดหมุนแกนเพลาลูกเบี้ยวในแนวแกน y m_y (มิลลิเมตร)	-112	-112	-112
ตำแหน่งจุดหมุนแกนเพลาลูกเบี้ยวในแนวแกน z m_z (มิลลิเมตร)	-220	220	0
ค่าเอียงศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลม e (มิลลิเมตร)	5	5	5
รัศมีของลูกเบี้ยววงกลม r (มิลลิเมตร)	50	50	50
มุมในอุดมคติของแนวเอียงศูนย์กลางของ ลูกเบี้ยววงกลม α (องศา)	-135	-135	-45
มุมสัมผัสในอุดมคติระหว่างลูกเบี้ยววงกลม กับตัวแทนรองรับแม่เหล็ก β (องศา)	135	135	45

3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระบบแกนอ้างอิงที่ใช้อธิบายการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าแนวแกน x มีทิศชี้ออกจากจุดศูนย์กลาง แนวแกน y มีทิศชี้ขึ้น และแนวแกน z มีทิศชี้ไปตามการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน (electron beam) โดยการเคลื่อนที่ในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z เราเรียกว่า Sway (u), Heave (v) และ Surge (w) ตามลำดับ การหมุนรอบแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z เราเรียกว่า Pitch (θ), Yaw (ψ) และ Roll (ϕ) ตามลำดับ การอ้างอิงมุมหมุนให้ค่ามุมเป็นบวกเมื่อมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา (Streun, 2000)



รูปที่ 3.3 ระบบแกนอ้างอิงที่ใช้อธิบายการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.3 การหมุนรอบแนวแกน x สามารถแสดงเมทริกซ์การหมุนได้ดังนี้

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

การหมุนรอบแนวแกน y สามารถแสดงเมทริกซ์การหมุนได้ดังนี้

$$R_y(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

และการหมุนรอบแนวแกน z สามารถแสดงเมทริกซ์การหมุนได้ดังนี้

$$R_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

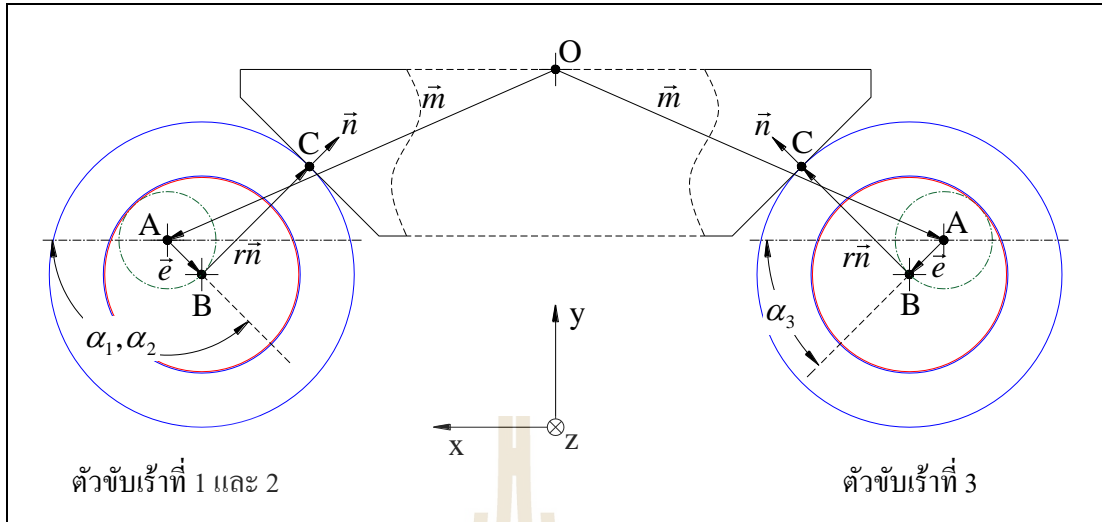
เมื่อพิจารณาการหมุนรอบแนวแกนทั้งสาม โดยเริ่มต้นด้วยการหมุนรอบแนวแกน x จากนั้นหมุนรอบแนวแกน y และสุดท้ายหมุนรอบแนวแกน z จะสามารถแสดงเมทริกซ์การหมุนรอบแนวแกนทั้งสามได้ดังนี้

$$R = R_z(\phi) R_y(\psi) R_x(\theta)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \phi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \cos \theta \sin \phi & \sin \theta \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \sin \psi \\ \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi + \sin \theta \sin \psi \sin \phi & \cos \theta \sin \psi \sin \phi - \cos \phi \sin \theta \\ -\sin \psi & \cos \psi \sin \theta & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

โดยที่ R คือ เมทริกซ์การหมุนรอบแนวแกนทั้งสาม
 $R_z(\phi)$ คือ เมทริกซ์การหมุนรอบแนวแกน z
 $R_y(\psi)$ คือ เมทริกซ์การหมุนรอบแนวแกน y
 $R_x(\theta)$ คือ เมทริกซ์การหมุนรอบแนวแกน x

ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจะใช้ลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนที่และการหมุน จากรูปที่ 3.2 สามารถเขียนแผนภาพเค้าร่างตัวขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางและตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก ได้ดังในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าลูกเบี้ยววงกลมจะหมุนในระนาบ xy ส่วนการหมุนในระนาบ yz มีค่าน้อยมากจะไม่นำมาพิจารณา กำหนดให้จุด A เป็นจุดหมุนของแกนเพลาลูกเบี้ยว จุด B คือจุดศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลม และลูกเบี้ยววงกลมสัมผัสกับตัวแท่นรองรับแม่เหล็กที่จุด C โดยเวกเตอร์ \vec{m} เริ่มต้นที่ตำแหน่งจุดอ้างอิง O ชี้ไปยังจุด A เวกเตอร์ \vec{e} เริ่มต้นที่จุด A ชี้ไปยังจุด B และเวกเตอร์ \vec{rn} เริ่มต้นที่จุด B ชี้ไปยังจุดที่ลูกเบี้ยววงกลมสัมผัสกับตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก



รูปที่ 3.4 แผนภาพเค้าร่างตัวจับเร้าด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลางและ
ตัวแทนรองรับแม่เหล็ก

การใช้งานแท่นรองรับแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน เราตรวจพบว่ามุมการหมุนของแท่นรองรับแม่เหล็กมีค่าน้อยมากอยู่ในระดับมิลลิเรเดียน หรือค่ามุมการหมุน $\theta, \psi, \phi \ll 1$ เรเดียน ดังนั้น จะสามารถประมาณการหมุนของตัวแทนรองรับแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นได้ ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.5 โดยจะทำการประมาณพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น มีดังนี้ $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, $\sin \psi \approx \psi$, $\cos \psi \approx 1$, $\sin \phi \approx \phi$ และ $\cos \phi \approx 1$ ดังนั้นเมทริกซ์การหมุนที่แสดงในสมการที่ (3-4) สามารถเขียนใหม่เป็นเมทริกซ์การหมุนแบบเชิงเส้นได้ ดังนี้

$$R_{linear} = \begin{bmatrix} 1 & -\phi & \psi \\ \phi & 1 & -\theta \\ -\psi & \theta & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ของตัวแทนรองรับแม่เหล็กแบบเลื่อนที่แสดงได้ ดังนี้

$$\vec{t} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจากตำแหน่งเวกเตอร์ในอุดมคติ \vec{x}_o ไปยังตำแหน่งเวกเตอร์ใหม่ \vec{x} ที่ประกอบไปด้วยการหมุนและการเลื่อนที่ แสดงได้ดังนี้

$$\vec{x} = R_{linear} \vec{x}_o + \vec{t} \quad (3-7)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3-5) และสมการที่ (3-6) ลงในสมการที่ (3-7) จะได้เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่สัมพันธ์กับการหมุนและการเลื่อนที่ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -\phi & \psi \\ \phi & 1 & -\theta \\ -\psi & \theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_o - \phi y_o + \psi z_o + u \\ y_o + \phi x_o - \theta z_o + v \\ z_o - \psi x_o + \theta y_o + w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-8)$$

จากรูปที่ 3.4 ลูกเบี้ยววงกลมหมุนได้ในระนาบ xy เท่านั้น และเวกเตอร์ \vec{e} แสดงได้ดังนี้

$$\vec{e} = e \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

เวกเตอร์ \vec{n} เป็นเวกเตอร์แนวตั้งฉากกับหน้าสัมผัสของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดให้มุม β_o เป็นมุมจุดสัมผัสในอุดมคติระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก และในทางอุดมคติเวกเตอร์ \vec{n}_o แสดงได้ดังนี้

$$\vec{n}_o = \begin{bmatrix} \cos \beta_o \\ \sin \beta_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

โดยที่ลูกเบี้ยววงกลมจะสัมผัสกับตัวแท่นรองรับแม่เหล็กที่จุด C ทำให้ผลรวมของเวกเตอร์จากจุดอ้างอิง O ถึงจุด C แสดงได้ดังนี้

$$\vec{c} = \vec{m} + \vec{e} + r\vec{n} \quad (3-11)$$

ขณะที่ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กยังไม่เกิดการหมุนและการเลื่อนที่ กำหนดให้เวกเตอร์ \vec{s}_o มีค่าเท่ากับเวกเตอร์ \vec{c}_o แต่เมื่อไหร่ที่ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเกิดการหมุนและการเลื่อนที่ขึ้น ตำแหน่งของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปทำให้เวกเตอร์ทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน $\vec{s}_o \neq \vec{c}$

เมื่อเราพิจารณาระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และการหมุนรอบแนวแกน z โดยกำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวแกน x การเคลื่อนที่ในแนวแกน z และการหมุนรอบแนวแกน y มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นเมทริกซ์การหมุนแบบเชิงเส้นดังที่แสดงในสมการที่ (3-5) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$R_{linear} = \begin{bmatrix} 1 & -\phi & 0 \\ \phi & 1 & -\theta \\ 0 & \theta & 1 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3-12) และสมการที่ (3-6) ลงในสมการที่ (3-7) จะได้เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งที่สัมพันธ์กับการหมุนและการเลื่อนที่ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -\phi & 0 \\ \phi & 1 & -\theta \\ 0 & \theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ v \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_o - \phi y_o \\ y_o + \phi x_o - \theta z_o + v \\ z_o + \theta y_o \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-13)$$

เมื่อตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเกิดการหมุนและการเลื่อนที่ขึ้น จะทำให้ผลรวมของเวกเตอร์จากจุด O ถึงจุดสัมผัสระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับตัวแท่นรองรับแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$(\vec{c} - \vec{s}_o) \cdot \vec{n} = 0 \quad (3-14)$$

และเวกเตอร์ \vec{e} สามารถเขียนใหม่เป็นเวกเตอร์ \vec{e}_t ดังนี้

$$\vec{e}_t = R_{linear} \vec{e} \quad (3-15)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3-12) และสมการที่ (3-9) ลงในสมการที่ (3-15) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\vec{e}_t &= \begin{bmatrix} 1 & -\phi & 0 \\ \phi & 1 & -\theta \\ 0 & \theta & 1 \end{bmatrix} e \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= e \begin{bmatrix} \cos \alpha - \phi \sin \alpha \\ \phi \cos \alpha + \sin \alpha \\ \theta \sin \alpha \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3-16)$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (3-11) ลงในสมการที่ (3-14) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}(\vec{m} + \vec{e}_t + r\vec{n} - \vec{s}_o) \cdot \vec{n} &= 0 \\ \vec{e}_t \cdot \vec{n} &= \vec{s}_o \cdot \vec{n} - \vec{m} \cdot \vec{n} - r\end{aligned}\quad (3-17)$$

จากสมการที่ (3-17) ทำการคำนวณค่าทางฝั่งซ้ายของสมการ *lhs.* จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}lhs. &= \vec{e}_t \cdot \vec{n} = \vec{e}_t \cdot \vec{n}_o \\ &= e \begin{bmatrix} \cos \alpha - \phi \sin \alpha \\ \phi \cos \alpha + \sin \alpha \\ \theta \sin \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta_o \\ \sin \beta_o \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= e((\cos \alpha \cos \beta_o + \sin \alpha \sin \beta_o) - (\phi \sin \alpha \cos \beta_o - \phi \cos \alpha \sin \beta_o))\end{aligned}$$

การนิยามฟังก์ชันตรีโกณมิติ

$$\begin{aligned}\sin(A \pm B) &= \sin A \cos B \pm \cos A \sin B \\ \cos(A \pm B) &= \cos A \cos B \mp \sin A \sin B\end{aligned}\quad (3-18)$$

เพราะฉะนั้นผลลัพธ์ทางฝั่งซ้ายของสมการที่ (3-17) จะได้ดังนี้

$$lhs. = e(\cos(\alpha - \beta_o) - \phi \sin(\alpha - \beta_o))\quad (3-19)$$

จากสมการที่ (3-17) ทำการคำนวณค่าทางฝั่งขวาของสมการ *rhs.* จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
rhs. &= \vec{s}_o \cdot \vec{n} - \vec{m} \cdot \vec{n} - r = (\vec{m}_o + \vec{e}_o + r\vec{n}) \cdot \vec{n}_o - \vec{m} \cdot \vec{n} - r \\
&= (\vec{m}_o - \vec{m}) \cdot \vec{n}_o + \vec{e}_o \cdot \vec{n}_o \\
&= \begin{bmatrix} -\phi m_y \\ \phi m_x - \theta m_z + v \\ \theta m_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta_o \\ \sin \beta_o \\ 0 \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} \cos \alpha_o \\ \sin \alpha_o \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta_o \\ \sin \beta_o \\ 0 \end{bmatrix} \\
&= (-\phi m_y) \cos \beta_o + (\phi m_x - \theta m_z + v) \sin \beta_o + e (\cos \alpha_o \cos \beta_o + \sin \alpha_o \sin \beta_o)
\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นผลลัพธ์ทางฝั่งขวาของสมการที่ (3-17) จะได้ดังนี้

$$rhs. = (-\phi m_y) \cos \beta_o + (\phi m_x - \theta m_z + v) \sin \beta_o + e (\cos(\alpha_o - \beta_o)) \quad (3-20)$$

กำหนดให้ $e (\cos(\alpha_o - \beta_o)) = 0$ เนื่องจากค่ามุมการหมุน α_o และ β_o ตั้งฉากกัน เมื่อแทนค่าผลลัพธ์ทางฝั่งซ้ายและผลลัพธ์ทางฝั่งขวาลงในสมการที่ (3-17) จะได้ดังนี้

$$\sin \beta_o v - m_z \sin \beta_o \theta + (m_x \sin \beta_o - m_y \cos \beta_o + e \sin(\alpha - \beta_o)) \phi = e \cos(\alpha - \beta_o) \quad (3-21)$$

จากสมการที่ (3-21) เมื่อระบบแท่นรองรับแม่เหล็กถูกขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางจำนวน 3 ชุด เพราะฉะนั้นจะสามารถเขียนสมการจลนศาสตร์ (kinematics equation) ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ได้ดังสมการที่ (3-22)

$$\begin{bmatrix} \sin \beta_{o1} & -m_{z1} \sin \beta_{o1} & m_{x1} \sin \beta_{o1} - m_{y1} \cos \beta_{o1} + e \sin(\alpha_1 - \beta_{o1}) \\ \sin \beta_{o2} & -m_{z2} \sin \beta_{o2} & m_{x2} \sin \beta_{o2} - m_{y2} \cos \beta_{o2} + e \sin(\alpha_2 - \beta_{o2}) \\ \sin \beta_{o3} & -m_{z3} \sin \beta_{o3} & m_{x3} \sin \beta_{o3} - m_{y3} \cos \beta_{o3} + e \sin(\alpha_3 - \beta_{o3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \cos(\alpha_1 - \beta_{o1}) \\ e \cos(\alpha_2 - \beta_{o2}) \\ e \cos(\alpha_3 - \beta_{o3}) \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

3.2.3 สมการจลนศาสตร์ผกผัน

การควบคุมการเคลื่อนไหวยของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กโดยใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางเป็นตัวขับเคลื่อน มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนคือ α_1 , α_2 และ α_3 เพราะว่าการเคลื่อนไหวยของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนดังกล่าว เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-19) จะเห็นได้ว่ามุมการหมุนของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กมีค่าน้อยมากในย่านมิลลิเรเดียนและค่ามุมหมุน $\phi \ll 1$ เรเดียน โดยเราจะทำการประมาณกลับของการเป็นเชิงเส้นดังนี้ $\phi \approx \sin \phi$

และ $1 \approx \cos \phi$ เพราะฉะนั้นสมการดังกล่าวสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} lhs. &= e(\cos(\alpha - \beta_o) - \phi \sin(\alpha - \beta_o)) \\ &= e(\cos(\alpha - \beta_o) \cos \phi - \sin(\alpha - \beta_o) \sin \phi) \end{aligned} \quad (3-23)$$

จากการนิยามฟังก์ชันตรีโกณมิติดังสมการที่ (3-18) จะได้ค่าทางฝั่งซ้ายของสมการ ดังนี้

$$lhs. = e(\cos(\alpha - \beta_o + \phi)) \quad (3-24)$$

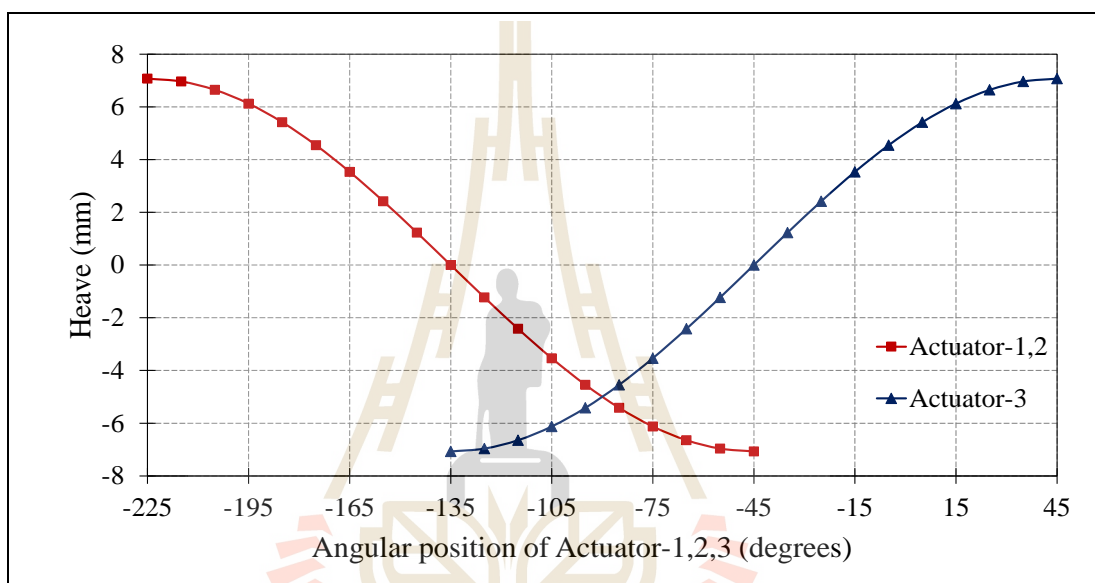
เมื่อแทนสมการที่ (3-24) และสมการที่ (3-20) ลงในจากสมการที่ (3-17) แล้วจะได้ค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าดังนี้

$$\alpha = \beta_o - \phi \pm \cos^{-1} \left(\frac{(-\phi m_y) \cos \beta_o + (\phi m_x - \theta m_z + v) \sin \beta_o}{e} \right) \quad (3-25)$$

เมื่อตัวแทนรองรับแม่เหล็กได้รับการขับเคลื่อนด้วยระบบขับเร้าด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง จำนวน 3 ชุด โดยสมการที่ (3-25) จะสามารถเขียนสมการจลนศาสตร์ผกผัน (inverse kinematics equation) ของระบบแทนรองรับแม่เหล็กได้ ซึ่งสมการจลนศาสตร์ผกผันเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และการหมุนของตัวแทนรองรับแม่เหล็กกับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าทั้งสาม เมื่อเรากำหนดค่าระยะการเคลื่อนที่และค่ามุมการหมุนของตัวแทนรองรับแม่เหล็กไว้ สมการจลนศาสตร์ผกผันจะคำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนที่ระบบขับเร้าทั้งสามจะต้องหมุนไป กำหนดให้สัญลักษณ์ p_1 และ p_2 มีค่าเท่ากับ +1 และ p_3 มีค่าเท่ากับ -1 เพื่อใช้บ่งบอกทิศทางการหมุนของระบบขับเร้า ดังนั้น สมการจลนศาสตร์ผกผันของระบบแทนรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-26)

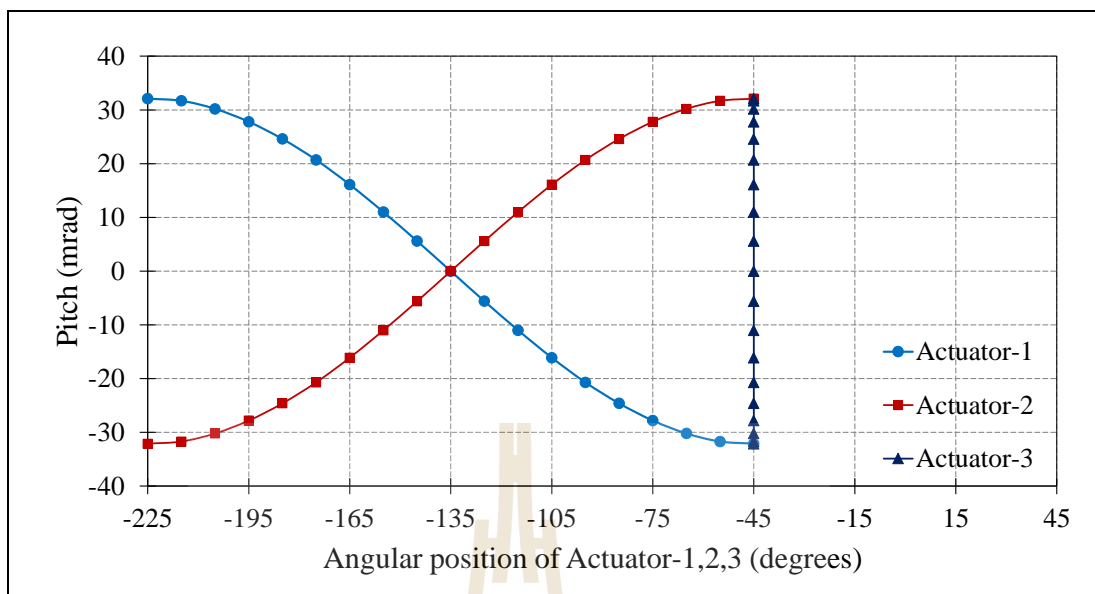
$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \beta_{o1} - \phi + p_1 \left(\cos^{-1} \left(\frac{(-\phi m_{y1}) \cos \beta_{o1} + (\phi m_{x1} - \theta m_{z1} + v) \sin \beta_{o1}}{e} \right) - \pi \right) - \pi \\ \alpha_2 &= \beta_{o2} - \phi + p_2 \left(\cos^{-1} \left(\frac{(-\phi m_{y2}) \cos \beta_{o2} + (\phi m_{x2} - \theta m_{z2} + v) \sin \beta_{o2}}{e} \right) - \pi \right) - \pi \\ \alpha_3 &= \beta_{o3} - \phi + p_3 \left(\cos^{-1} \left(\frac{(-\phi m_{y3}) \cos \beta_{o3} + (\phi m_{x3} - \theta m_{z3} + v) \sin \beta_{o3}}{e} \right) - \pi \right) - \pi \end{aligned} \quad (3-26)$$

จากสมการจลนศาสตร์ที่แสดงในสมการที่ (3-22) และข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ทำการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 (angular position of actuator-1, 2,3) โดยผลการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.5 กราฟรูปที่ 3.6 และกราฟรูปที่ 3.7 ตามลำดับ

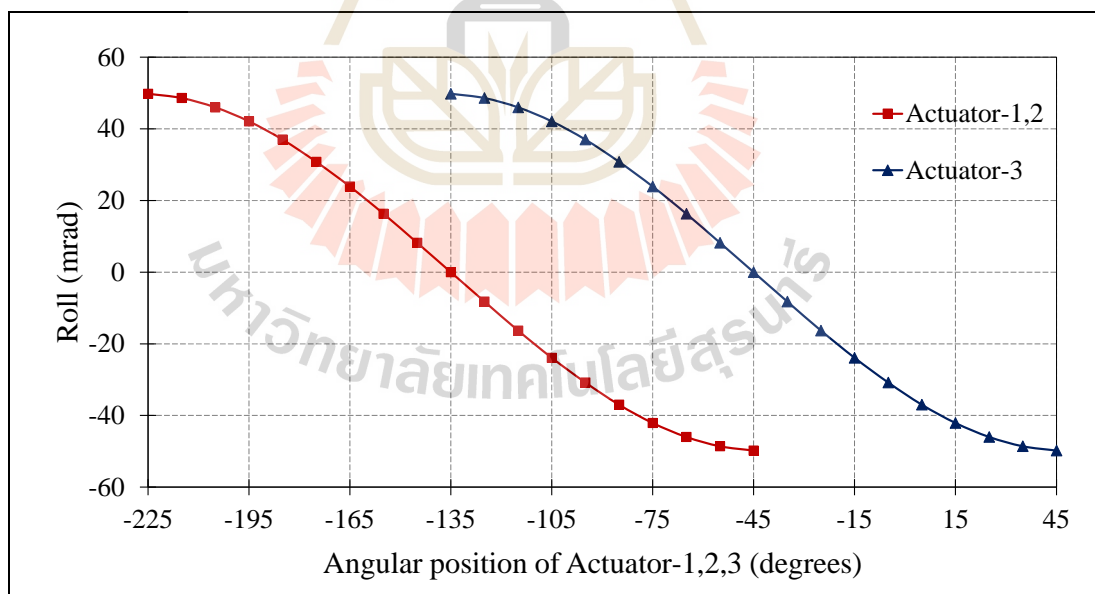


รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

จากกราฟรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ในแนวแกน y มีพิสัยระยะการเคลื่อนที่ ± 7.07 มิลลิเมตร ระบบขับเคลื่อนที่ 1 และ 2 หมุนที่ค่ามุมเดียวกัน และมีทิศตรงกันข้ามกับระบบขับเคลื่อนที่ 3 เช่น ถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่ค่า +6 มิลลิเมตร จะต้องหมุนระบบขับเคลื่อนที่ 1 และ 2 ไปที่ค่าตำแหน่งเชิงมุม -195 องศา และต้องหมุนระบบขับเคลื่อนที่ 3 ไปที่ค่าตำแหน่งเชิงมุม $+15$ องศา โดยที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ในช่วง ± 6 มิลลิเมตร เราจะสามารถประมาณการเคลื่อนที่ให้เป็นแบบเชิงเส้น



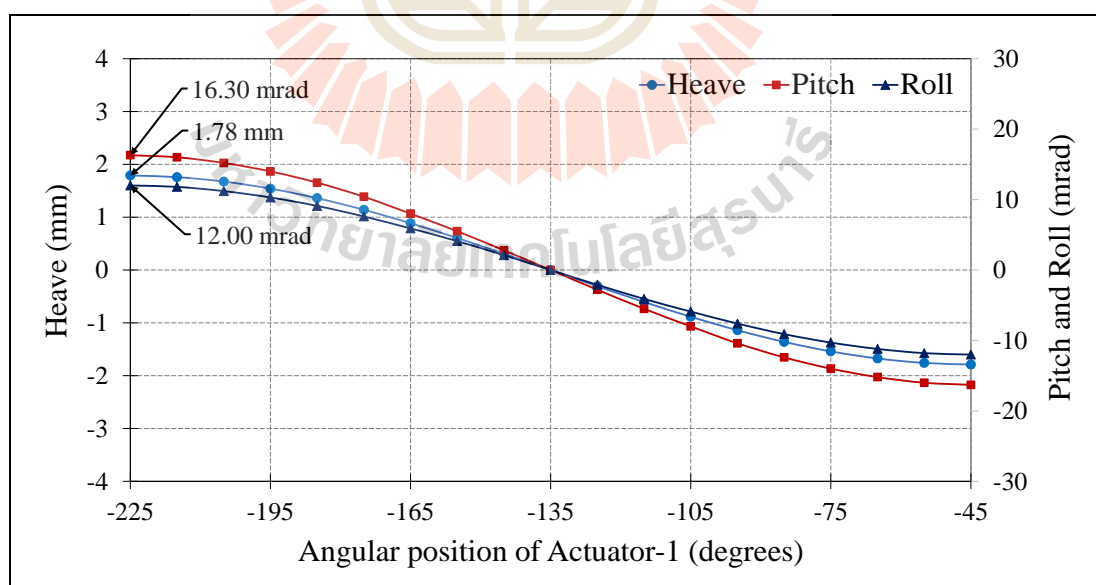
รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแกน x (Pitch) กับตำแหน่งเชิงมุม การหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3



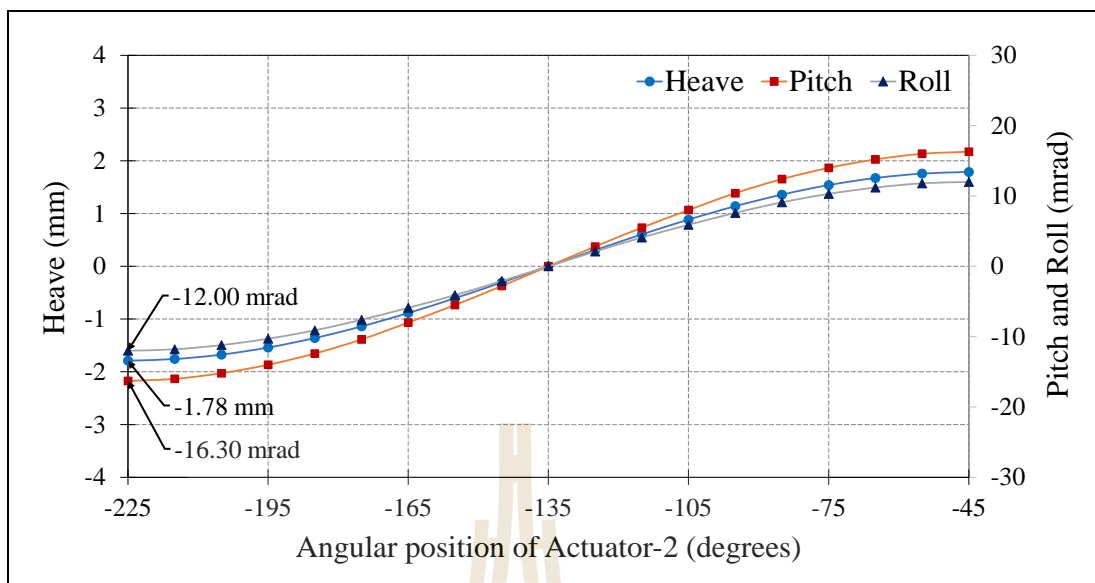
รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุม การหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

จากกราฟรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าการหมุนรอบแนวแกน x มีพิสัยการหมุน ± 32.14 มิลลิเรเดียน ระบบขับเร้าที่ 1 กับระบบขับเร้าที่ 2 หมุนที่ค่ามุมเดียวกัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ส่วนระบบขับเร้าที่ 3 ไม่เกิดการหมุน เช่น ถ้าต้องการให้เกิดการหมุนรอบแนวแกน x ที่ค่า $+20$ มิลลิเรเดียน จะต้องหมุนระบบขับเร้าที่ 1 ไปที่ค่าตำแหน่งเชิงมุม -175 องศา และจะต้องหมุนระบบขับเร้าที่ 2 ไปที่ค่าตำแหน่งเชิงมุม -95 องศา โดยระบบขับเร้าที่ 3 ไม่มีการหมุน โดยที่มุมการหมุนในช่วง ± 20 มิลลิเรเดียน จะประมาณการหมุนให้เป็นแบบเชิงเส้น และจากกราฟรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าการหมุนรอบแนวแกน z มีพิสัยการหมุน ± 49.79 มิลลิเรเดียน ระบบขับเร้าที่ 1 และ 2 หมุนที่ค่ามุมเดียวกันและไปในทิศทางเดียวกันกับระบบขับเร้าที่ 3 เช่น ถ้าต้องการให้เกิดการหมุนรอบแนวแกน z ที่ค่า $+30$ มิลลิเรเดียน จะต้องหมุนระบบขับเร้าที่ 1 และ 2 ไปที่ค่าตำแหน่งเชิงมุม -175 องศา และจะต้องหมุนระบบขับเร้าที่ 3 ไปที่ค่าตำแหน่งเชิงมุม -85 องศา โดยที่มุมการหมุนในช่วง ± 30 มิลลิเรเดียน จะประมาณการหมุนให้เป็นแบบเชิงเส้น

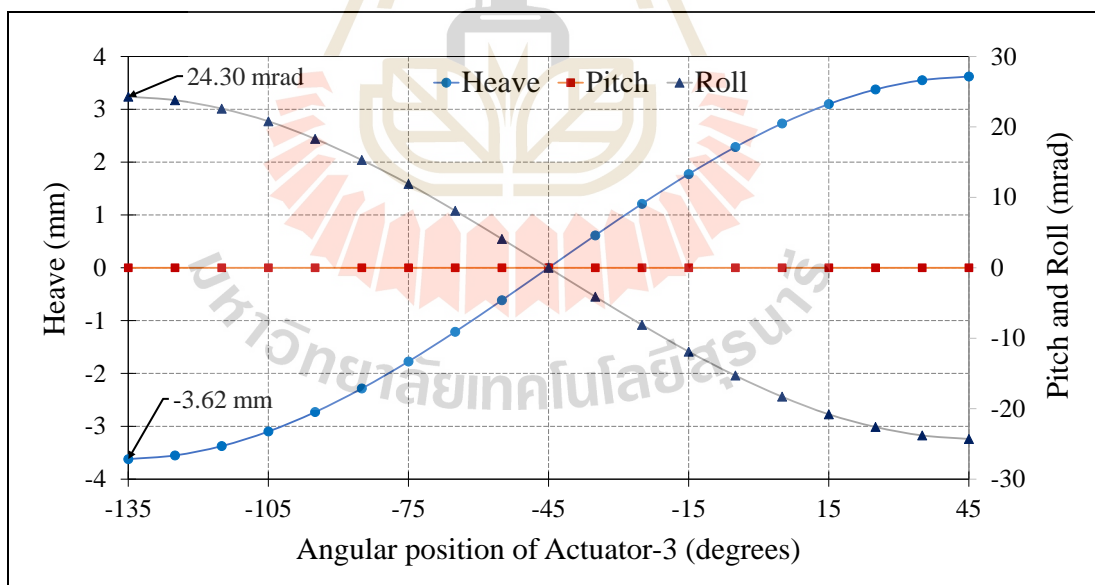
จากสมการจลนศาสตร์ดังสมการที่ (3-22) และข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ทำการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และการหมุนรอบแนวแกน z กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าแต่ละตัว โดยผลการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.8 กราฟรูปที่ 3.9 และกราฟรูปที่ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนระบบขับเร้าที่ 1



รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนระบบขับเคลื่อนที่ 2



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนระบบขับเคลื่อนที่ 3

จากกราฟรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบขับเร้าที่ 1 หมุนจากค่าตำแหน่งเชิงมุม -225 องศา ถึง -45 องศา จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน y มีพิสัยการเคลื่อนที่ ± 1.78 มิลลิเมตร เกิดการหมุนรอบแนวแกน x มีพิสัยมุมการหมุน ± 16.30 มิลลิเรเดียน และเกิดการหมุนรอบแนวแกน z มีพิสัยมุมการหมุน ± 12.00 มิลลิเรเดียน จากกราฟรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบขับเร้าที่ 2 หมุนจากค่ามุม -225 องศา ถึง -45 องศา จะเกิดการเคลื่อนไหวในลักษณะคล้ายกันกับกรณีของระบบขับเร้าที่ 1 แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน และจากกราฟรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบขับเร้าที่ 3 หมุนจากค่ามุม -135 องศา ถึง 45 องศา จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน y มีพิสัยการเคลื่อนที่ ± 3.62 มิลลิเมตร เกิดการหมุนรอบแนวแกน z มีพิสัยมุมการหมุน ± 24.30 มิลลิเรเดียน

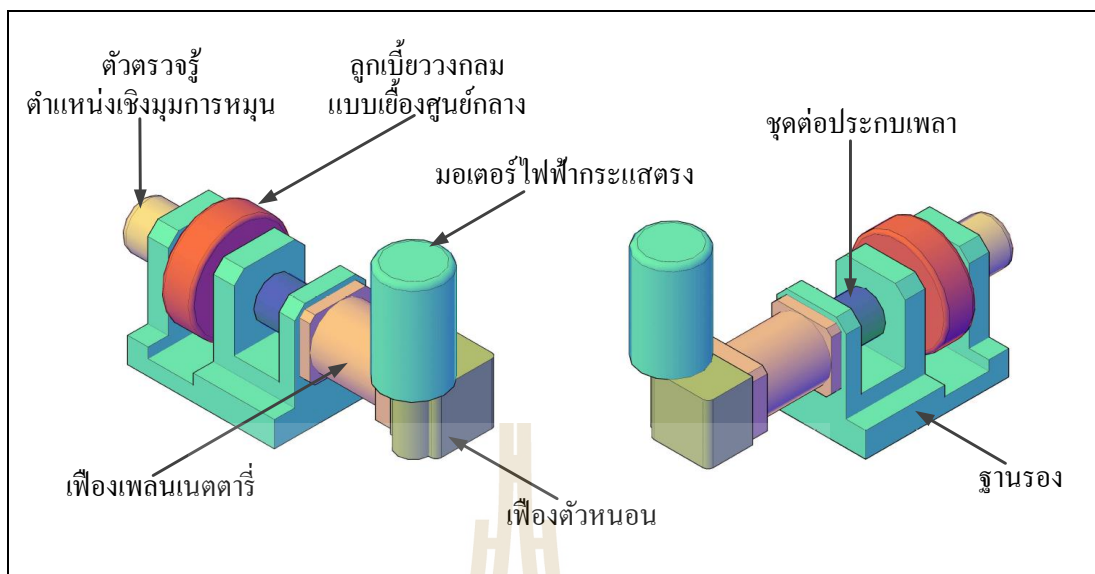
จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณีจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ที่เชื่อมโยงกันกับการหมุนของระบบขับเร้าทั้งสามชุด เพราะฉะนั้นระบบแท่นรองรับแม่เหล็กจะใช้งานระบบขับเร้าทั้งสามชุดพร้อมกันเพื่อขับเคลื่อนให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเคลื่อนไหวไปสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้

3.3 การออกแบบระบบขับเร้าด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง

ระบบขับเร้าด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางเป็นส่วนที่ใช้ขับเคลื่อนตัวแท่นรองรับแม่เหล็กให้เกิดการเคลื่อนไหว จะต้องมีความมั่นคงและแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักได้ทั้งตัวแท่นรองรับแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กทรอนิกส์ การหมุนจะต้องมีความละเอียดและแม่นยำสูง

3.3.1 มิติและขนาดของตัวโครงสร้าง

ระบบขับเร้ามีโครงสร้างที่จะประกอบไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร ใช้เป็นตัวขับเร้าให้เกิดการหมุน ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางและแพร่หลาย และใช้ในการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนได้เป็นอย่างดี (Yang, 2009, Mannfeddin, 2010, Abd El Ghaffar, 2011 และ Beltran-Carbajal, 2014) ชุดเฟืองตัวหนอนใช้ส่งกำลังและใช้เพื่อหยุดการเคลื่อนไหวให้กับตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก เนื่องจากเฟืองตัวหนอนมีคุณสมบัติการล็อกตัวเอง (Kapelevich, 2010) ชุดเฟืองเพลาเนตตารีใช้ส่งกำลัง (Schulze, 2010) ให้กับลูกเบี้ยววงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีค่าเยื้องศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร โดยลูกเบี้ยววงกลมจะเป็นตัวขับเคลื่อนให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนไหว ซึ่งค่าเยื้องศูนย์กลางเป็นตัวกำหนดระยะการเคลื่อนไหวได้มากน้อยเพียงใด (Rothbart, 2004 และ Kempainen, 2012) ใช้ตัวประกอบเพลาเชื่อมเฟืองเพลาเนตตารีกับแกนเพลาหมุน และติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนที่ปลายแกนเพลา โดยที่ปลายแกนเพลาหมุนทั้งสองด้านติดตั้งตัวลูกปืนรองรับไว้และตำแหน่งแกนเพลาเยื้องศูนย์กลางติดตั้งตัวลูกปืนรองรับลูกเบี้ยววงกลม การออกแบบระบบขับเร้าด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การออกแบบระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง

ระบบขับเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 3.11 จำนวนสามชุดจะทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้ตัวแปรรองรับแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ด้วยการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน การออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบขับเคลื่อนจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะประมาณขึ้น และการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ทั้งการวัดค่าและการระบุเอกลักษณ์ให้กับพารามิเตอร์ที่วัดค่าไม่ได้ ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและเหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

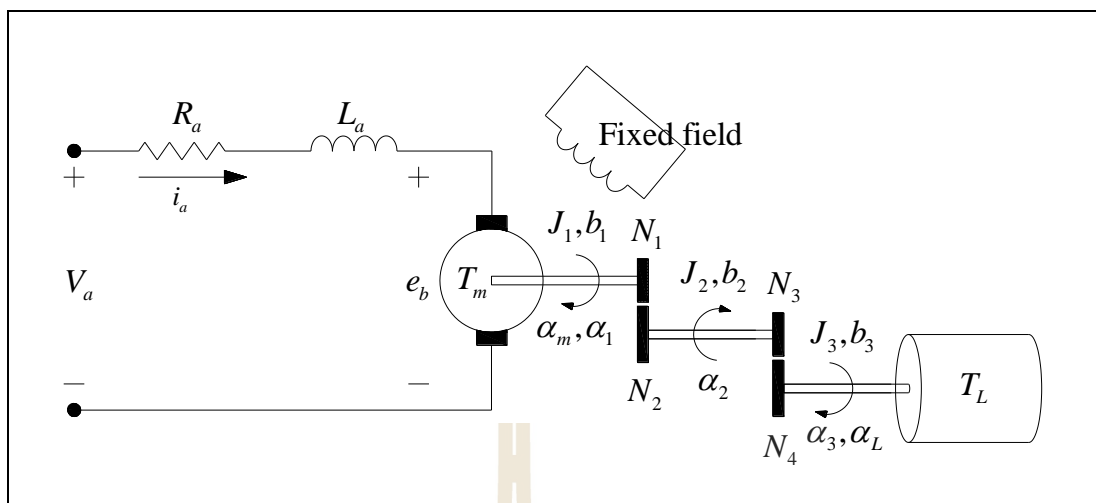
การออกแบบตัวควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนให้ได้ทั้งความละเอียดและแม่นยำสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและเหมาะสม จากรูปที่ 3.11 เขียนแผนภาพเค้าร่างระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางได้ดัง รูปที่ 3.12 โดยสมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของระบบขับเคลื่อน มีดังนี้

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (3-27)$$

$$e_b(t) = K_b \omega_m(t) \quad (3-28)$$

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (3-29)$$

$$J_1 \frac{d\omega_m(t)}{dt} + b_1 \omega_m(t) + T_1(t) = T_m(t) \quad (3-30)$$



รูปที่ 3.12 แผนภาพเค้าร่างระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเชิงศูนย์กลาง

โดยที่	$V_a(t)$	คือแรงดันไฟฟ้าอาร์มาเจอร์ (armature voltage, V)
	R_a	คือความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ (resistance of armature winding, Ω)
	L_a	คือความเหนี่ยวนำขดลวดอาร์มาเจอร์ (inductance of armature winding, H)
	$i_a(t)$	คือกระแสไฟฟ้าอาร์มาเจอร์ (armature current, A)
	$e_b(t)$	คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back emf, V)
	K_b	คือสัมประสิทธิ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (motor back emf constant, V/rad/s)
	K_t	คือสัมประสิทธิ์แรงบิดมอเตอร์ (motor torque constant, N.m/A)
	J	คือโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia, kg.m^2)
	b	คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืด (viscous friction coefficient, N.m/rad/s)
	$T_m(t)$	คือแรงบิดมอเตอร์ (motor torque, N.m)
	$T_L(t)$	คือแรงบิดโหลด (load torque, N.m)
	$\omega_m(t)$	คือความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (angular velocity of motor, rad/s)
	$\omega_L(t)$	คือความเร็วเชิงมุมของลูกเบี้ยว (angular velocity of cam, rad/s)
	$\alpha_m(t)$	คือตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ (angular position of motor, rad)
	$\alpha_L(t)$	คือตำแหน่งเชิงมุมของลูกเบี้ยว (angular position of cam, rad)
	$\frac{N_1}{N_2}$	คืออัตราทดเฟืองตัวหนอน
	$\frac{N_3}{N_4}$	คืออัตราทดเฟืองเพลาเนตารี

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมการหมุน อัตราทดเฟือง และแรงบิด มีดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\alpha_2}{\alpha_1} &= \frac{N_1}{N_2} \rightarrow \alpha_1 = \frac{N_2}{N_1} \alpha_2, \alpha_2 = \frac{N_4}{N_3} \alpha_3 = \frac{N_4}{N_3} \alpha_L \\ \alpha_m &= \alpha_1 = \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} \alpha_3 = \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} \alpha_L \rightarrow N_t = \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} \\ T_1 \alpha_1 &= T_2 \alpha_2 \rightarrow T_2 = \frac{N_2}{N_1} T_1, T_4 = \frac{N_4}{N_3} T_3\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3-28) และสมการที่ (3-27) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$e_b(t) = K_b \omega_m(t) = K_b \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} \omega_L(t) \quad (3-31)$$

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} \omega_L(t) \quad (3-32)$$

จากสมการที่ (3-30) สามารถเขียนสมการต่อเนื่องของแรงบิดจากมอเตอร์ถึงโหลดได้ ดังนี้

$$T_m(t) = J_1 \frac{d^2 \alpha_1(t)}{dt^2} + b_1 \frac{d\alpha_1(t)}{dt} + T_1(t) \quad (3-33)$$

$$T_2(t) = J_2 \frac{d^2 \alpha_2(t)}{dt^2} + b_2 \frac{d\alpha_2(t)}{dt} + T_3(t) \quad (3-34)$$

$$T_4(t) = J_3 \frac{d^2 \alpha_3(t)}{dt^2} + b_3 \frac{d\alpha_3(t)}{dt} + T_L(t) \quad (3-35)$$

แทนค่า $T_2(t)$ ในสมการที่ (3-34) กำหนดให้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนอยู่ในรูปของ $\alpha_3(t)$ จะได้

$$\begin{aligned}T_3(t) &= \frac{N_2}{N_1} T_1(t) - J_2 \frac{d^2 \alpha_2(t)}{dt^2} - b_2 \frac{d\alpha_2(t)}{dt} \\ &= \frac{N_2}{N_1} T_1(t) - \frac{N_4}{N_3} J_2 \frac{d^2 \alpha_3(t)}{dt^2} - \frac{N_4}{N_3} b_2 \frac{d\alpha_3(t)}{dt}\end{aligned} \quad (3-36)$$

แทนค่า $T_4(t)$ ลงในสมการที่ (3-35) จะได้

$$\frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} T_1(t) - \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 J_2 \frac{d^2 \alpha_3(t)}{dt^2} - \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 b_2 \frac{d\alpha_3(t)}{dt} = J_3 \frac{d^2 \alpha_3(t)}{dt^2} + b_3 \frac{d\alpha_3(t)}{dt} + T_L(t) \quad (3-37)$$

จากสมการที่ (3-33) กำหนดให้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนอยู่ในรูปของ $\alpha_3(t)$ จะได้

$$\begin{aligned} T_1(t) &= T_m(t) - J_1 \frac{d^2 \alpha_1(t)}{dt^2} - b_1 \frac{d\alpha_1(t)}{dt} \\ &= T_m(t) - \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} J_1 \frac{d^2 \alpha_3(t)}{dt^2} - \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} b_1 \frac{d\alpha_3(t)}{dt} \end{aligned} \quad (3-38)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่า $T_1(t)$ ลงในสมการที่ (3-37) จะได้

$$\begin{aligned} &\left(J_3 + \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 J_2 + \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 J_1 \right) \frac{d^2 \alpha_3(t)}{dt^2} + \left(b_3 + \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 b_2 + \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 b_1 \right) \frac{d\alpha_3(t)}{dt} \\ &+ T_L(t) = \frac{N_2}{N_1} \frac{N_4}{N_3} T_m(t) \end{aligned}$$

กำหนดให้โมเมนต์ความเฉื่อยรวมและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดรวมของระบบขับเคลื่อน ดังนี้

$$J_{3eq} = J_3 + \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 J_2 + \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 J_1, \quad b_{3eq} = b_3 + \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 b_2 + \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{N_4}{N_3} \right)^2 b_1$$

ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3-30) จะเขียนสมการด้านเอาต์พุตได้ดังนี้

$$J_{3eq} \frac{d^2 \alpha_L(t)}{dt^2} + b_{3eq} \frac{d\alpha_L(t)}{dt} + T_L(t) = N_t T_m(t) \quad (3-39)$$

และจากสมการที่ (3-32) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3-40) เมื่อแทนค่าสมการที่ (3-29) ลงในสมการที่ (3-39) และกำหนดให้ความเร็วเชิงมุมอยู่ในรูปของ $\omega_L(t)$ จะได้สมการที่ (3-41)

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + N_t K_b \omega_L(t) \quad (3-40)$$

$$J_{3eq} \frac{d\omega_L(t)}{dt} + b_{3eq} \omega_L(t) + T_L(t) = N_t K_t i_a(t) \quad (3-41)$$

ทำการแปลงลาปลาซให้กับสมการที่ (3-40) และสมการที่ (3-41) โดยกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ดังนี้

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + s L_a I_a(s) + N_t K_b \omega_L(s) \quad (3-42)$$

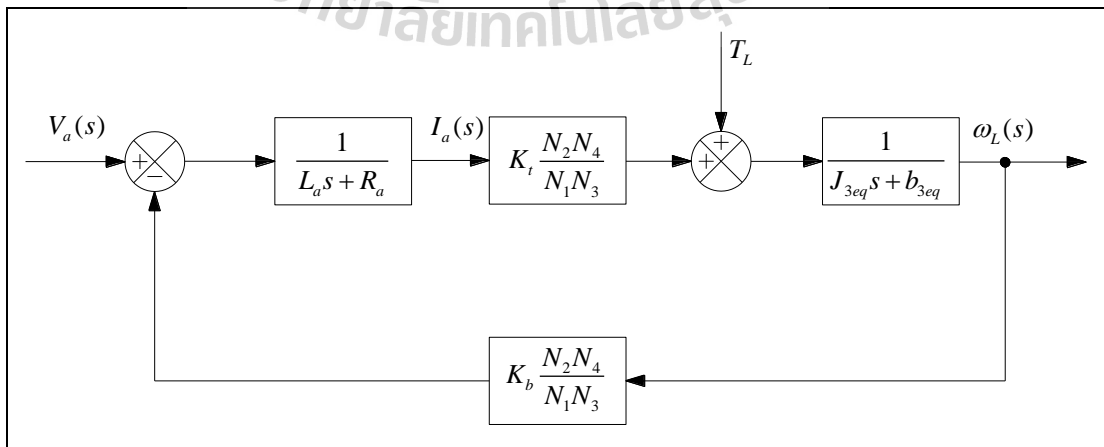
$$s J_{3eq} \omega_L(s) + b_{3eq} \omega_L(s) + T_L(s) = N_t K_t I_a(s) \quad (3-43)$$

จากสมการที่ (3-42) และสมการที่ (3-43) เมื่อไม่พิจารณาแรงบิดจากโหลดภายนอก T_L จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมการหมุนเอาต์พุตกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตได้ดังสมการที่ (3-44) และฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมการหมุนเอาต์พุตกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตได้ดังสมการที่ (3-45)

$$\frac{\omega_L(s)}{V_a(s)} = \frac{N_t K_t}{L_a J_{3eq} s^2 + (R_a J_{3eq} + L_a b_{3eq}) s + (R_a b_{3eq} + N_t^2 K_b K_t)} \quad (3-44)$$

$$\frac{\alpha_L(s)}{V_a(s)} = \frac{N_t K_t}{L_a J_{3eq} s^3 + (R_a J_{3eq} + L_a b_{3eq}) s^2 + (R_a b_{3eq} + N_t^2 K_b K_t) s} \quad (3-45)$$

จากสมการที่ (3-42) และสมการที่ (3-43) นำมาเขียนแผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อนแบบวงเปิด แสดงได้ดังรูปที่ 3.13



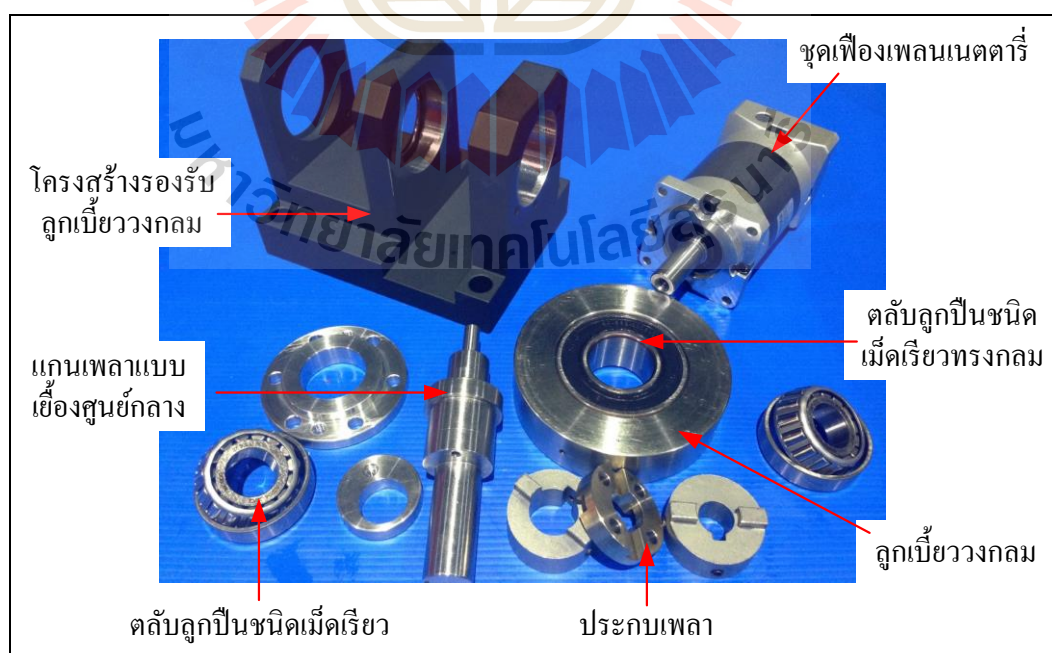
รูปที่ 3.13 แผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อนแบบวงเปิด

3.4 การจัดสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง จำนวน 3 ชุด ที่มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร ติดตั้งมาพร้อมกับเฟืองตัวหนอน ชุดเฟืองเพลาเนตตารี ลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง และตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ส่วนนี้ต้องสร้างชิ้นงานบางส่วนเพื่อใช้ประกอบติดตั้ง ส่วนที่สองเป็นตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก จะมีตัวตรวจรู้การเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ส่วนที่สามเป็นตัวฐานรอง ใช้สำหรับสร้างการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบ หรือเพื่อสร้างสถานการณ์ให้พื้นอาคารเกิดทรุดตัวและเอียงตัวขึ้น

3.4.1 การจัดสร้างชิ้นงาน

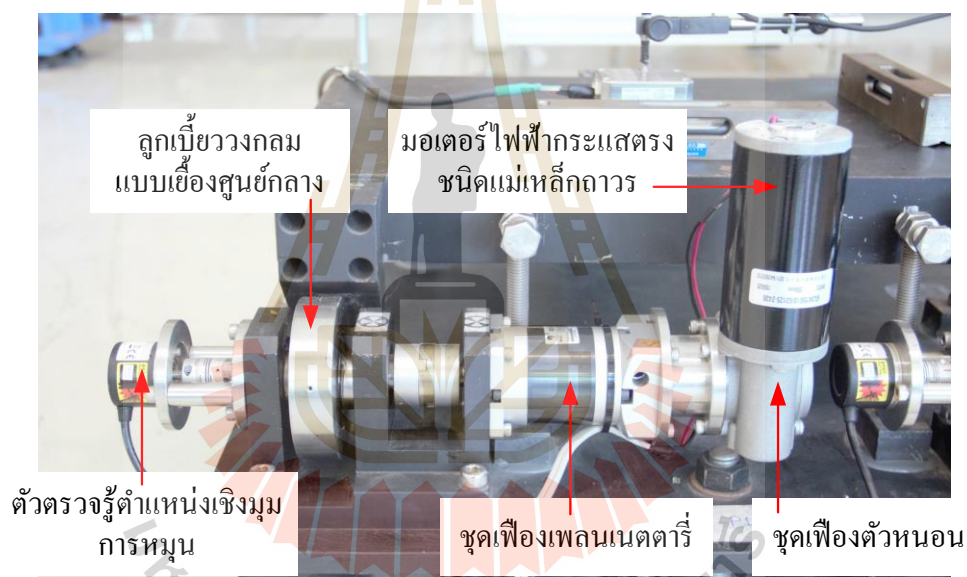
การสร้างชิ้นงานมีดังนี้ โครงสร้างฐานรอง โครงสร้างตัวรองรับลูกเบี้ยววงกลม แกนเพลลาหมุนที่มีค่าเยื้องศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ลูกเบี้ยววงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ตัวต่อประกอบเฟืองตัวหนอนเข้ากับเฟืองเพลาเนตตารี ตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยการออกแบบระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 การออกแบบตัวแท่นรองรับแม่เหล็กได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ทั้งนี้การจัดสร้างชิ้นงานได้ดำเนินการที่โรงเครื่องมือกลของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน การสร้างชิ้นงานของระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง แสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การสร้างชิ้นงานของระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง

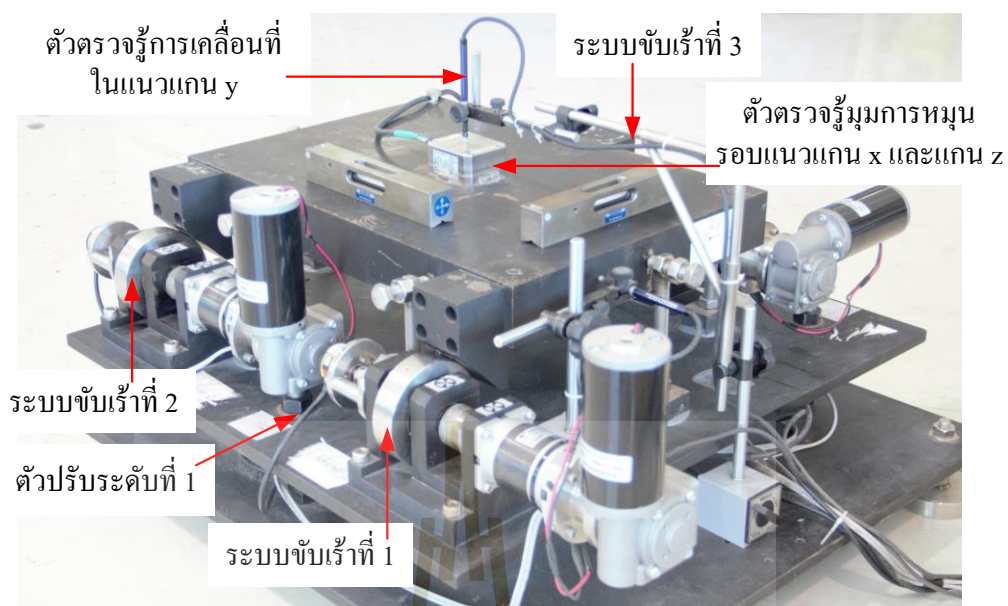
3.4.2 การประกอบติดตั้ง

การประกอบติดตั้งระบบขับเคลื่อนมีดังนี้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาพร้อมกับเฟืองตัวหนอนที่มีอัตราทด 15:1 รุ่น DONGZHENG 63JW15G10 ต่อกับเฟืองเพลาเนตตารีที่มีอัตราทด 50:1 รุ่น PENGHUI PLF-60-L2-50 ต่อกับแกนเพลาดำด้วยตัวประกอบเพลารุ่น MISUMI MCOGWK ที่ปลายแกนเพลาดัดตั้งตลับลูกปืนชนิดเม็ดรีียว รุ่น SKF 30204 J2/Q ไว้รองรับการหมุนที่ตำแหน่งแกนเพลายกขึ้นยกลง 5 มิลลิเมตร ติดตั้งตลับลูกปืนชนิดเม็ดรีียวทรงกลม รุ่น SKF BS2-2206-2CS ไว้รองรับลูกเบี้ยววงกลม และที่ปลายแกนเพลาดัดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน รุ่น LS S40-6-2500ZO ที่มีความละเอียดการวัด 2,500 สเต็ปต่อรอบ ซึ่งระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลางที่ประกอบติดตั้งแล้วเสร็จ แสดงได้ดังรูปที่ 3.15

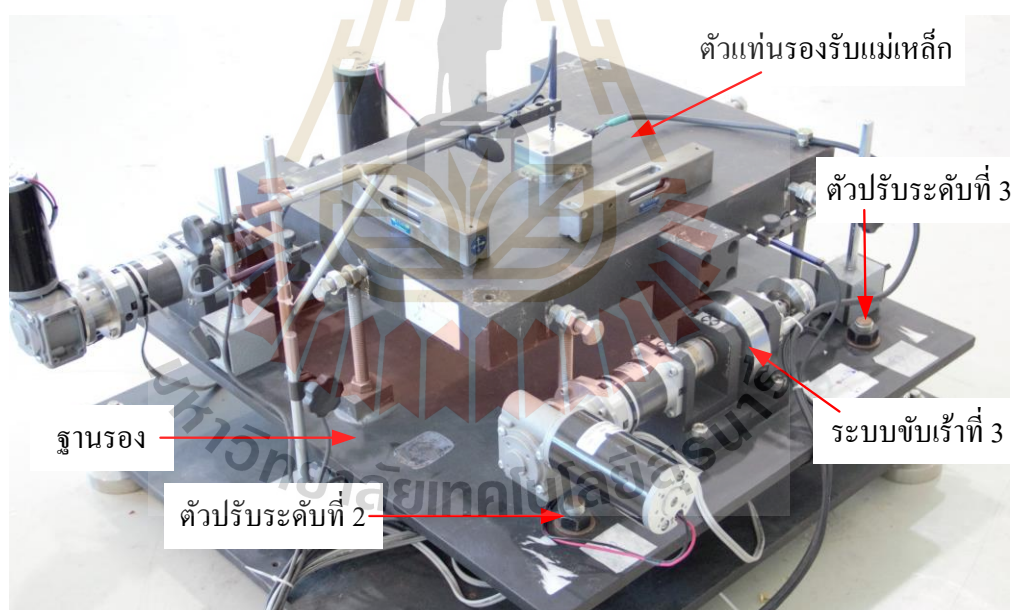


รูปที่ 3.15 ระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลาง

การประกอบติดตั้งระบบแท่นรองรับแม่เหล็กตามแบบที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และทำการยึดตัวแท่นรองรับให้การเคลื่อนที่ตามแนวแกน x และแนวแกน z การหมุนรอบแนวแกน y มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ที่ประกอบติดตั้งแล้วเสร็จ แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าการติดตั้งตัวตรวจรู้ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y รุ่น CITIZEN IPD-P510 ที่ความแม่นยำของการวัด 5 ไมโครเมตร และตัวตรวจรู้มุมเอียงแบบสองแกนวัดมุมการหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z รุ่น NEIGUNG QG76-SD010H ที่ความแม่นยำของการวัด 0.6 มิลลิเรเดียน ที่ตำแหน่งตรงกลางบนตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก



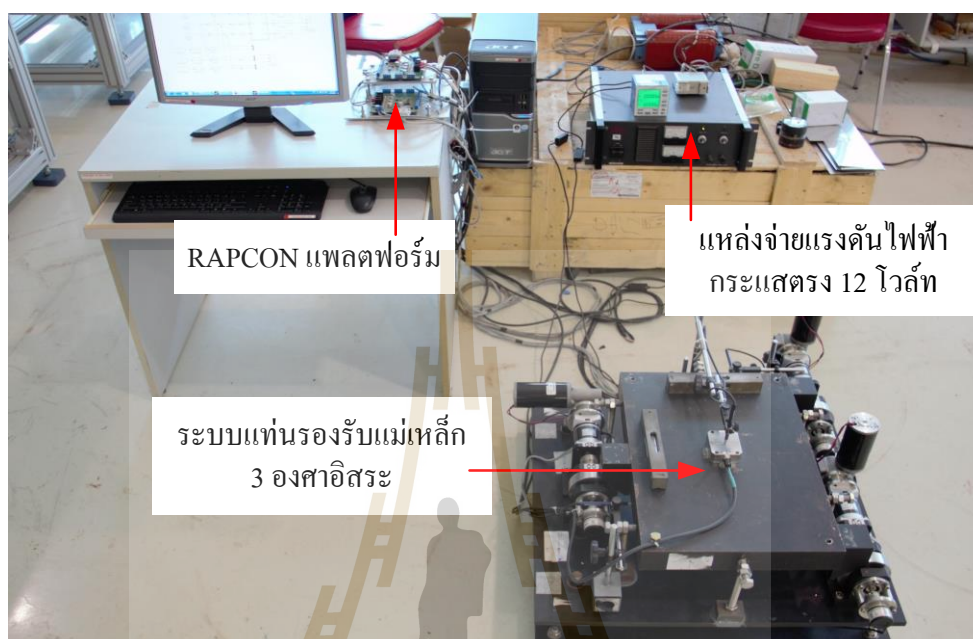
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.16 ระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ

การติดตั้งอุปกรณ์ระบบควบคุม แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และอุปกรณ์อื่นๆ สำหรับใช้ในการทดสอบระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 3.17

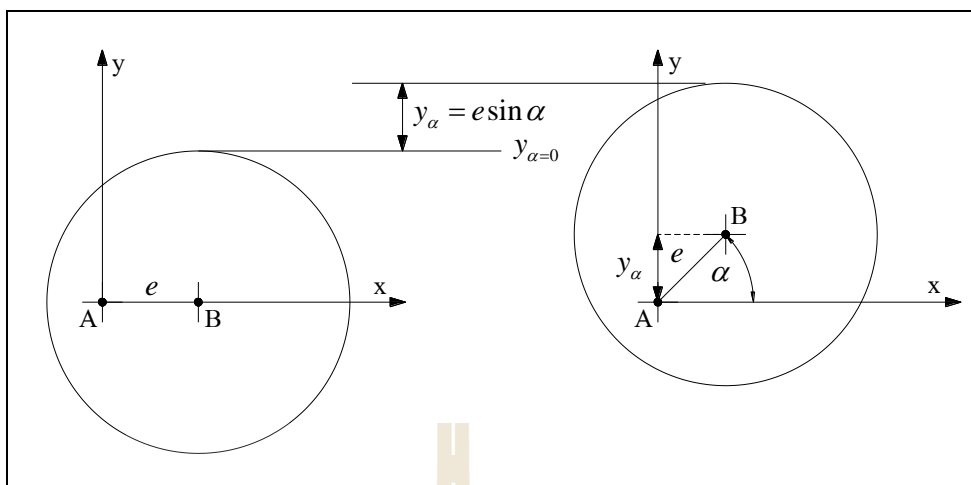


รูปที่ 3.17 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ

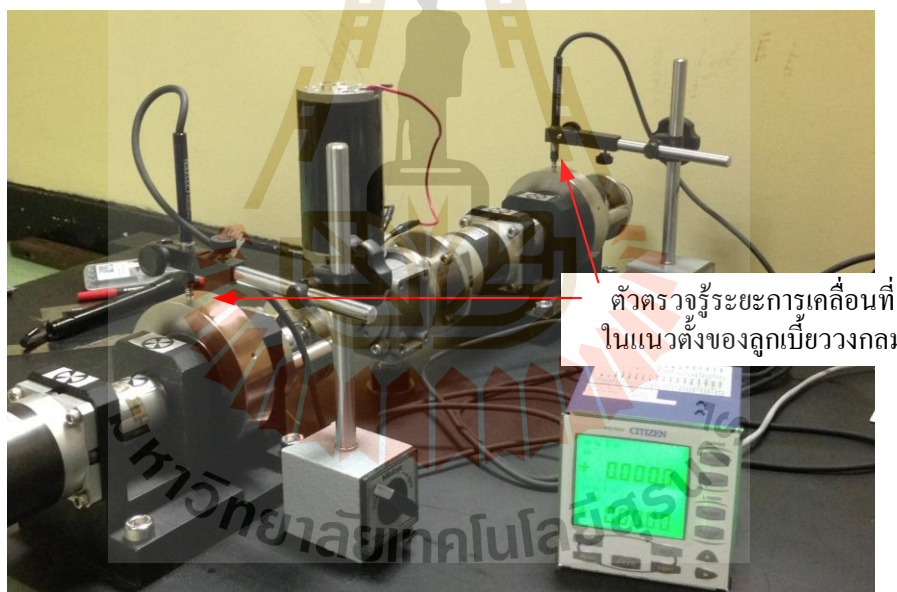
3.4.3 การทดสอบระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเร้า

การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเร้า (อ้างอิงแนวแกน y ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก) เพื่อตรวจสอบการจัดสร้างระบบขับเร้ากับค่าที่ได้ออกแบบไว้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.18 จะเห็นว่าจุด A คือจุดหมุนของแกนเพลลา จุด B คือจุดศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลม e คือค่าเยื้องศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร α คือตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้า y_α คือระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเมื่อระบบขับเร้าหมุนไปที่ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน α และจะสังเกตเห็นได้ว่าขนาดของลูกเบี้ยววงกลมไม่ได้มีผลต่อการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเลย การเคลื่อนที่ในแนวตั้งจะขึ้นกับค่าเยื้องศูนย์กลางและตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าเท่านั้น

การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเร้า แสดงได้ดังรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าใช้ตัวตรวจวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง รุ่น CITIZEN IPD-P510 และติดตั้งในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง



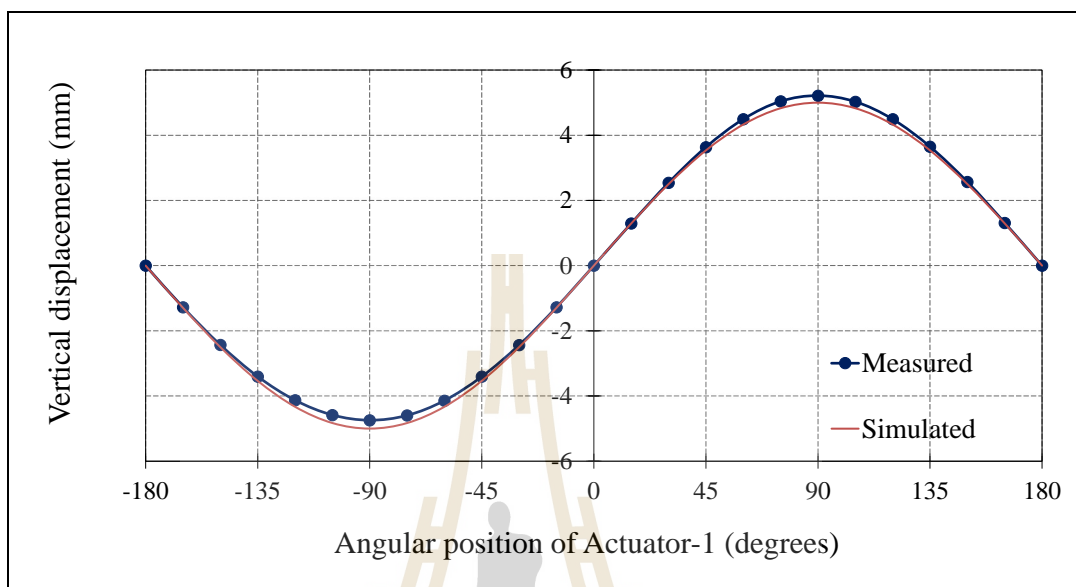
รูปที่ 3.18 แผนภาพระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่สัมพันธ์กับมุมหมุนของลูกเบี้ยววงกลม



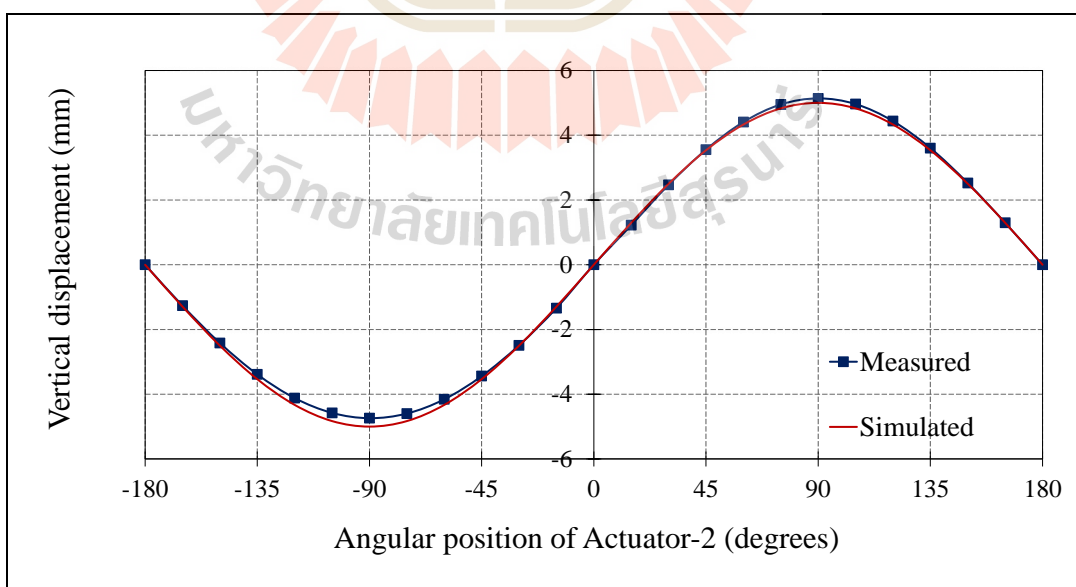
รูปที่ 3.19 การทดสอบระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

ผลการทดสอบระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical displacement) ของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.20 กราฟรูปที่ 3.21 และกราฟรูปที่ 3.22 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งสามกราฟให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันกับผลการจำลองสถานการณ์ โดยที่ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนที่ +90 องศา และ -90 องศา ผลการทดสอบได้ค่าน้อยกว่าการจำลองสถานการณ์ประมาณ 0.25 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลจากการจัดสร้างชิ้นงาน โดยผลการจำลองสถานการณ์ที่ตำแหน่งเชิงมุมการ

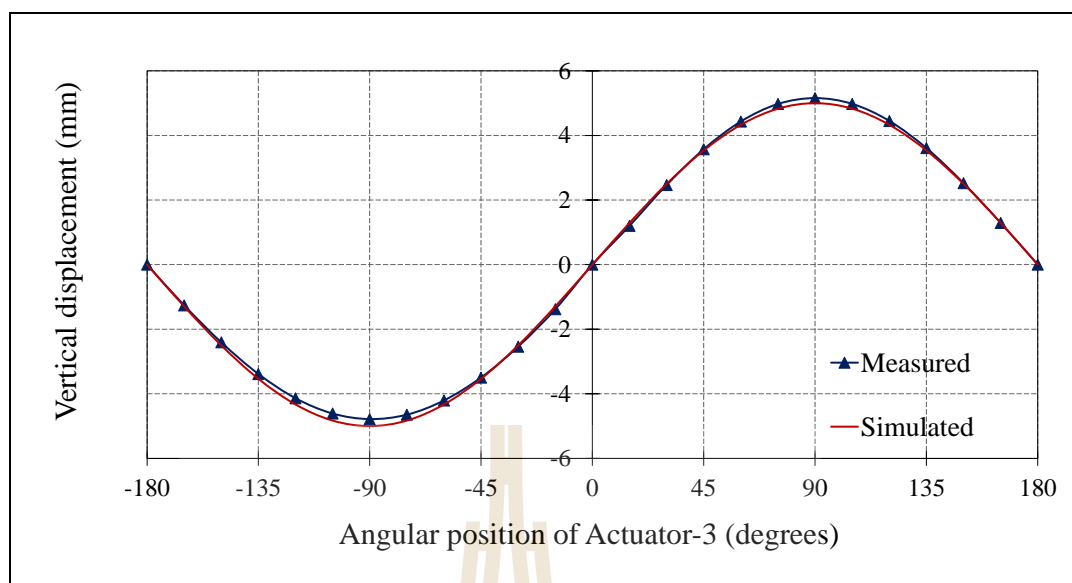
หมุนที่ +90 องศา จะให้ค่าระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง +5 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนที่ -90 องศา จะให้ค่าระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง -5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเคลื่อนที่ 1



รูปที่ 3.21 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเคลื่อนที่ 2

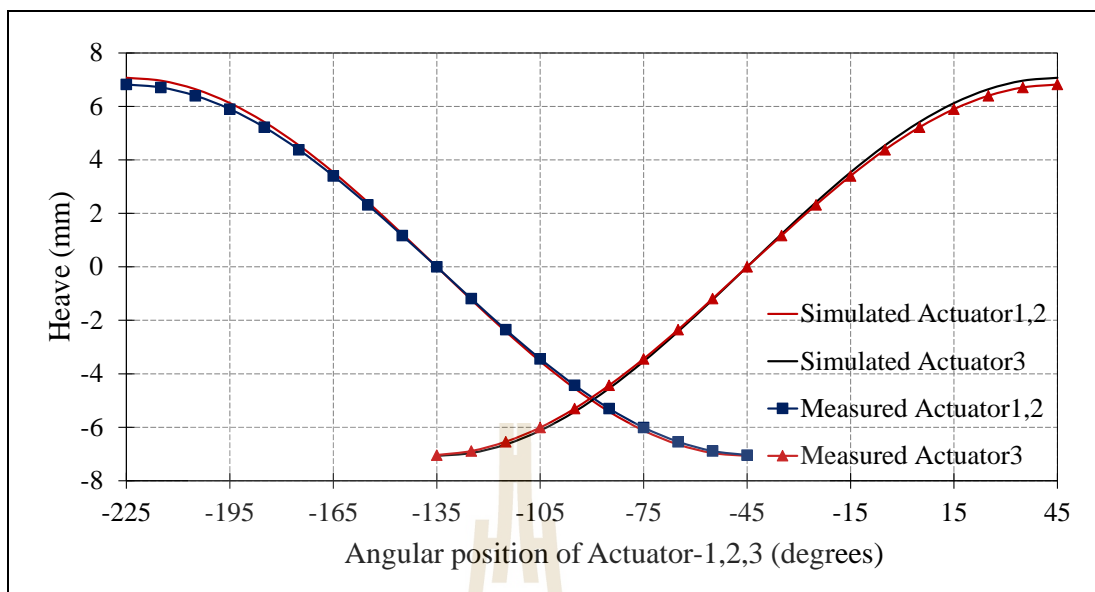


รูปที่ 3.22 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเร้าที่ 3

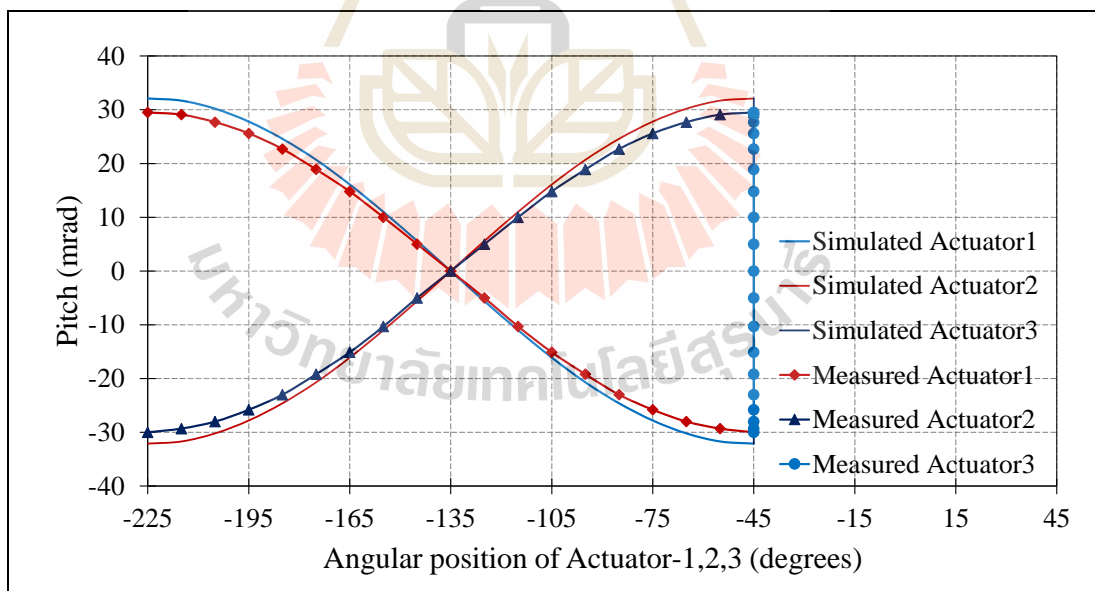
3.4.4 การทดสอบการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก

การทดสอบการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และการหมุนรอบแนวแกน z เพื่อตรวจสอบการจัดสร้างกับผลจากการจำลองสถานการณ์ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร (Supachai, 2016) การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบการเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก แสดงได้ดังในรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 จะเห็นว่าตัวตรวจรู้ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y และตัวตรวจรู้มุมการหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางบนตัวแท่นรองรับแม่เหล็กหรือที่จุดอ้างอิงจุด O

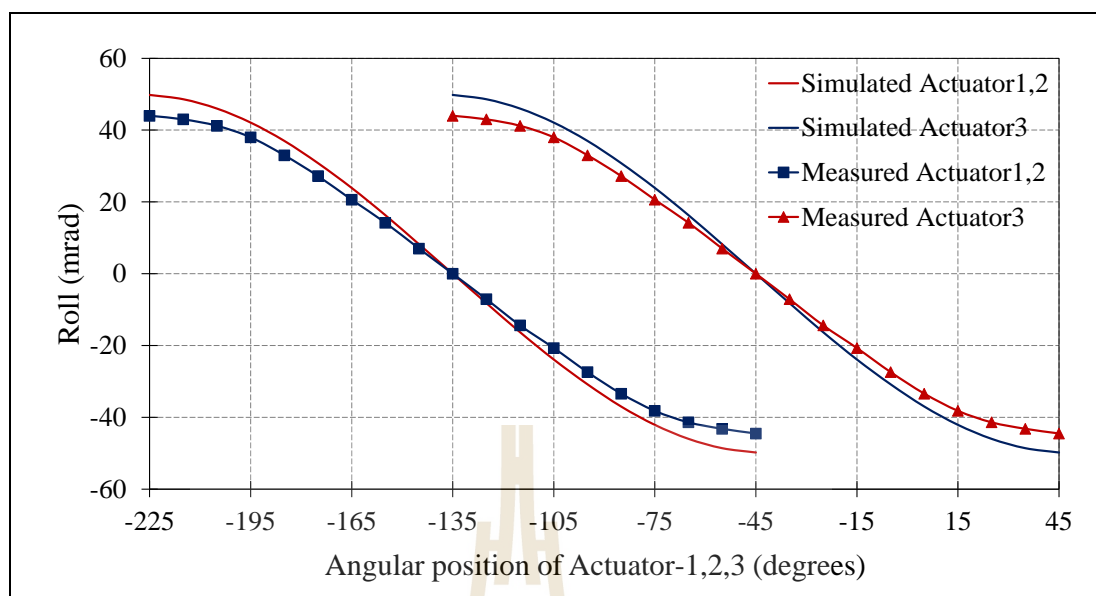
ผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3 แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.23 กราฟรูปที่ 3.24 และกราฟรูปที่ 3.25 ตามลำดับ จากกราฟทั้งสามจะเห็นได้ว่าผลทดสอบมีความสอดคล้องกันและค่าใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ได้ประมาณขึ้น มีความถูกต้องและเหมาะสมสามารถนำไปใช้งานได้ โดยที่ผลทดสอบมีค่าน้อยกว่าผลการจำลองสถานการณ์ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดสร้างชิ้นงานและการประกอบติดตั้ง อีกทั้งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ได้ประมาณขึ้น การเชื่อมต่อกันและสัมผัสกันเป็นแบบจุดต่อจุด แต่การจัดสร้างชิ้นงานจะแตกต่างออกไป



รูปที่ 3.23 กราฟเปรียบเทียบผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 3.24 กราฟเปรียบเทียบผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 3.25 กราฟเปรียบเทียบผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

3.5 สรุป

การออกแบบระบบแท่นรองรับแม่เหล็กให้มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่ค่าระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x ที่ค่ามุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และการหมุนรอบแนวแกน z ที่ค่ามุมหมุน ± 30 มิลลิเรเดียน โดยตัวแท่นรองรับแม่เหล็กได้รับการขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางจำนวน 3 ชุด โดยสามารถรองรับน้ำหนักได้ประมาณ 100 กิโลกรัม การออกแบบเริ่มต้นด้วยการกำหนดมิติและขนาดของตัวโครงสร้าง การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการจลนศาสตร์ และสมการจลนศาสตร์ผกผันให้กับระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับระบบขับเคลื่อน จากนั้นดำเนินการจัดสร้างชิ้นงานและประกอบติดตั้ง แล้วทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 แล้วเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กกับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 แล้วเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ดังนั้น การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติต่อไปได้

บทที่ 4

การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหวยึดอัตโนมัติ

4.1 บทนำ

การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหวยึดอัตโนมัติจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อน ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กจะสามารถเคลื่อนไหวยึดอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงที่ระบบควบคุมจะทำการปรับตัวเองเพื่อให้เอาต์พุตของระบบมีค่าตามรอยแนววิถีอ้างอิงได้ และแบบคงค่าเอาต์พุตที่ระบบจะทำการปรับตัวเองเพื่อให้เอาต์พุตของระบบมีค่าคงที่ได้ เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบ

ระบบควบคุมอัตโนมัติแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นรูปควบคุมด้านใน เป็นการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ส่วนที่สองเป็นรูปควบคุมด้านนอกเป็นการควบคุมการเคลื่อนไหวยึดของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนทั้งสามชุด ด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล เพื่อให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถตามรอยแนววิถีอ้างอิงและคงค่าเอาต์พุตได้

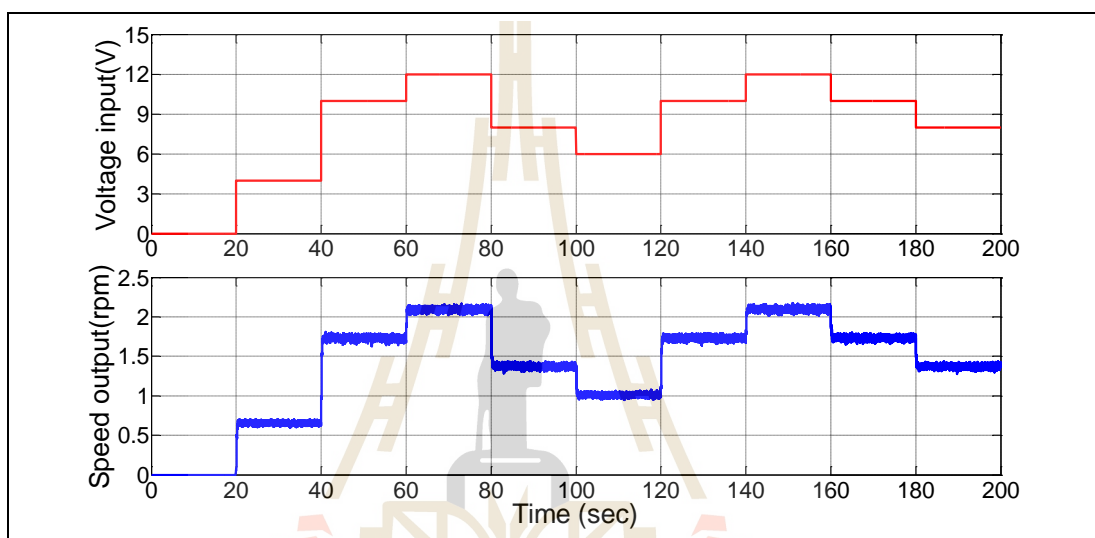
4.2 การออกแบบตัวควบคุมของระบบขับเคลื่อน

การออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง เพื่อควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้ได้ทั้งความละเอียดและแม่นยำสูง จะอาศัยการวัดค่าพารามิเตอร์และการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ที่วัดค่าไม่ได้ การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของเรทและทฤษฎีบทเลียปูนอฟ และการจำลองสถานการณ์

4.2.1 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์

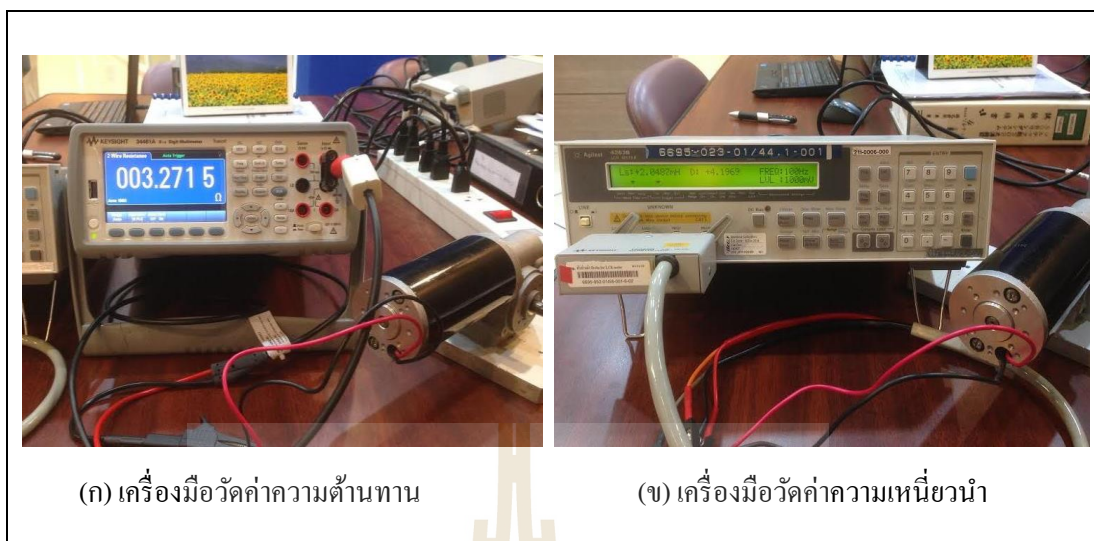
การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์เป็นการประมาณค่าที่เหมาะสมให้กับพารามิเตอร์ที่วัดค่าไม่ได้ โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลองระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์กับความเร็วเชิงมุมของระบบขับเคลื่อน โดยพารามิเตอร์ R_a และ L_a สามารถวัดค่าได้ ส่วนพารามิเตอร์ K_t , K_b , J_{3eq} และ b_{3eq} ไม่สามารถวัดค่าได้

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์จะอ้างอิงแผนภาพการควบคุมความเร็วเชิงมุมของระบบขับเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์และเอาต์พุตเป็นความเร็วเชิงมุมของระบบขับเคลื่อน กราฟแรงดันไฟฟ้าอินพุตและความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อนที่ได้จากการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต (voltage input) กำหนดค่าไว้ในช่วง 0 โวลต์ ถึง 12 โวลต์ และความเร็วเชิงมุมเอาต์พุต (speed output) ของระบบขับเคลื่อนมีความสอดคล้องกัน

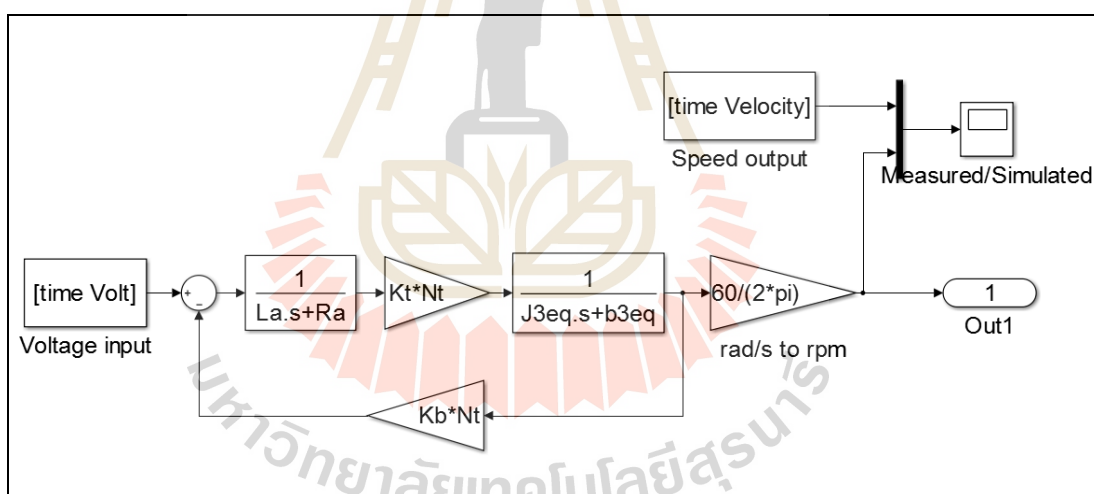


รูปที่ 4.1 กราฟทดสอบแรงดันไฟฟ้าอินพุตและความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตระบบขับเคลื่อน

การวัดค่าความต้านทานใช้เครื่องมือวัดรุ่น KEYSIGH 34461A ได้ $R_a = 3.2715 \, \Omega$ และค่าความเหนี่ยวนำใช้เครื่องมือวัดรุ่น Agilent 4263B ได้ $L_a = 2.0487 \times 10^{-3} \, \text{H}$ เครื่องมือวัดค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยระบบขับเคลื่อนใช้เฟืองตัวหนอนที่มีอัตราทดเฟือง 15:1 และเฟืองเพลาแนตตารีที่มีอัตราทดเฟือง 50:1 ทำให้อัตราทดเฟืองรวม $N_t = 750$ การประมาณค่าพารามิเตอร์ K_t , K_b , J_{3eq} และ b_{3eq} จะใช้เทคนิควิธีการ Parameter Estimation ในโปรแกรม MATLAB/Simulink (Koech, 2016 และ <https://www.mathworks.com>) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอินพุตเป็นข้อมูลแรงดันไฟฟ้ากับเวลา และเอาต์พุตเป็นข้อมูลการทดสอบความเร็วเชิงมุมของระบบขับเคลื่อนกับเวลา โปรแกรมจะประมาณค่าให้กับพารามิเตอร์และใช้เทคนิควิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วย Simplex Search Method (สุจินต์, 2556) เมื่อค่าผิดพลาดระหว่างข้อมูลการทดสอบความเร็วเชิงมุมกับค่าที่ได้จากการประมาณอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ โปรแกรมจะให้ค่าการประมาณของพารามิเตอร์ได้

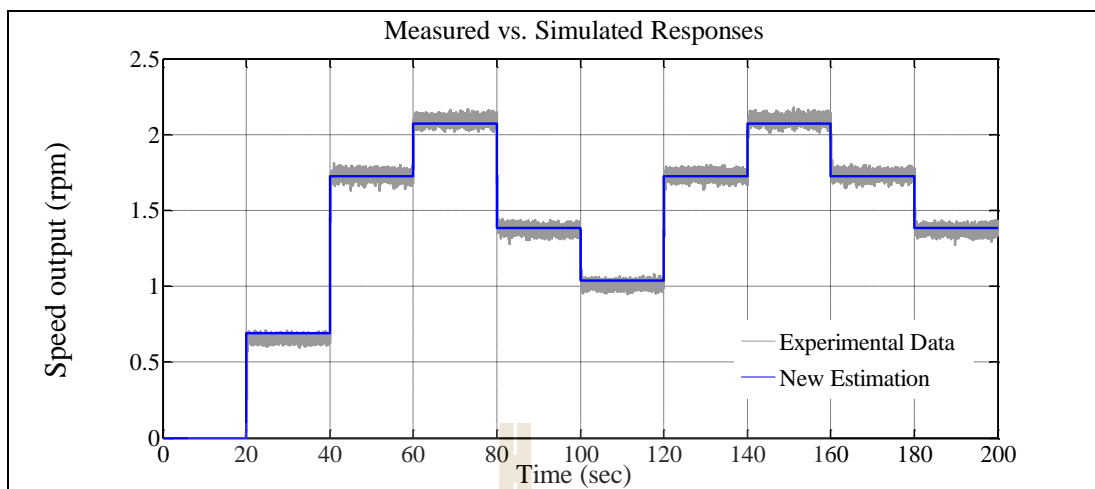


รูปที่ 4.2 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบขับเคลื่อนด้วยวิธีการ
Parameter Estimation ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

กราฟการเปรียบเทียบค่าระหว่างข้อมูลการทดสอบความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตกับค่าที่ได้จากการประมาณ แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าการประมาณ (new estimation) ซ้อนทับกันกับกราฟข้อมูลการทดสอบความเร็วเชิงมุมเอาต์พุต (experimental data) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ได้ มีความถูกต้องและเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบกับการประมาณค่า
ใช้วิธีการ Parameter Estimation ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

เพราะฉะนั้นระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลาง จะมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

$$R_a = 3.2715 \, \Omega$$

$$L_a = 2.0487 \times 10^{-3} \, \text{H}$$

$$K_t = 9.5361 \times 10^{-3} \, \text{N.m/A}$$

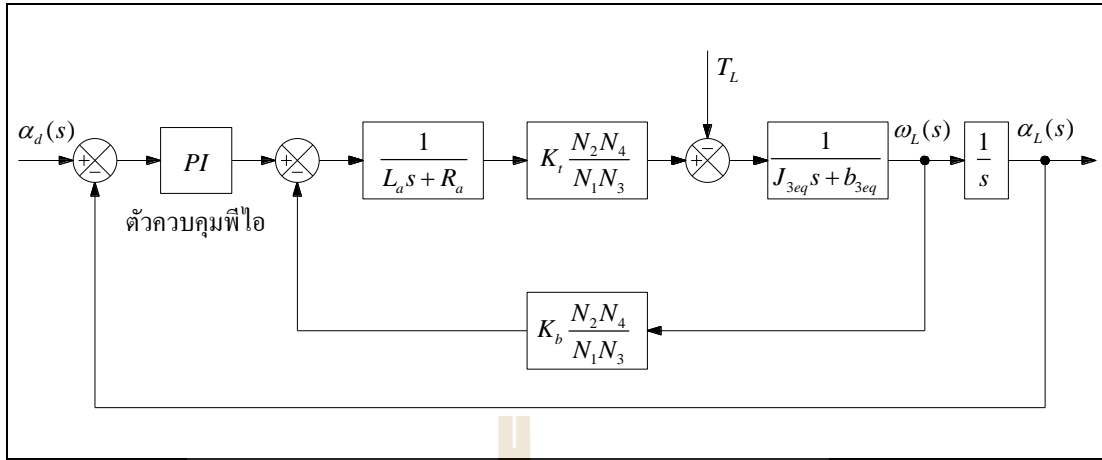
$$K_b = 7.0103 \times 10^{-2} \, \text{V/rad/s}$$

$$J_{3eq} = 14.7729 \, \text{kg.m}^2$$

$$b_{3eq} = 5.8634 \, \text{N.m/rad/s}$$

4.2.2 การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลางใช้แผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วเชิงมุม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (proportional-integral controller) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตให้กับมอเตอร์ ตัวควบคุมแบบพีไอถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางและแพร่หลาย (Farhan, 2013 และ El-din Gamal, 2015) แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเอียงศูนย์กลางแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนเอาต์พุตคือ α_L ถูกป้อนกลับและเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิงคือ α_d ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นส่งเข้าตัวควบคุมแบบพีไอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมแบบพีไอแสดงได้ดังในสมการที่ (2-4) และโครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

ระบบขับเคลื่อนมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังที่แสดงในสมการที่ (3-45) เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบขับเคลื่อนดังนี้

$$G_a(s) = \frac{\alpha_L(s)}{V_a(s)} = \frac{236.3131}{s^3 + 1,597.2632s^2 + 13,058.4969s} \quad (4-1)$$

จะเห็นได้ว่าระบบขับเคลื่อนเป็นระบบประเภทที่ 1 มีค่าอันดับเท่ากับสาม โดยตัวควบคุมแบบพีไอมิฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนี้

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (4-2)$$

จากรูปที่ 4.5 เมื่อรวมตัวควบคุมแบบพีไอเข้ากับระบบขับเคลื่อนแล้วจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบขับเคลื่อนเป็นระบบประเภทที่ 0 มีอันดับเท่ากับสี่ ดังสมการที่ (4-3)

$$\begin{aligned} T(s) &= \frac{\alpha_L(s)}{\alpha_d(s)} \\ &= \frac{236.3131(K_p s + K_I)}{s^4 + 1,597.2632s^3 + 13,058.4969s^2 + 236.3131K_p s + 236.3131K_I} \end{aligned} \quad (4-3)$$

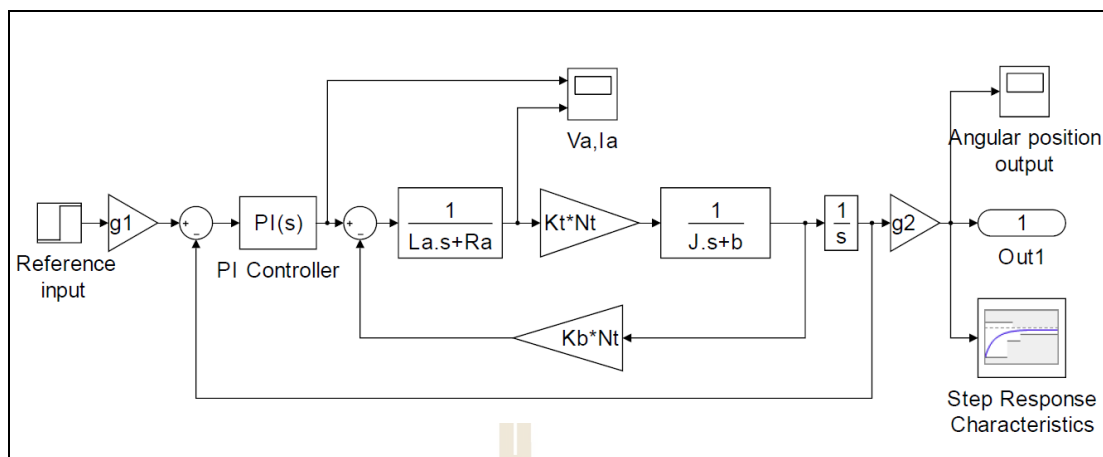
จะเห็นได้ว่าถ้ากำหนดให้อัตราขยาย K_p และ K_I มีค่าเป็นบวก จะได้โพลวงปิดทั้งหมดอยู่ทางด้านซ้ายของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน จะสามารถใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้ายเพื่อหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้ โดยระบบจะมีค่าผิดพลาดดังนี้

$$\begin{aligned} E(s) &= \alpha_d(s) - \alpha_L(s) \\ &= \alpha_d(s)(1 - T(s)) \\ &= \frac{(s^4 + 1,597.26s^3 + 13,058.49s^2) \alpha_d(s)}{s^4 + 1,597.26s^3 + 13,058.49s^2 + 236.31K_p s + 236.31K_I} \end{aligned} \quad (4-4)$$

เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงเป็นแบบขั้นหนึ่งหน่วย จะได้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวดังสมการที่ (4-5) จะเห็นได้ว่าระบบดังกล่าวมีค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเท่ากับศูนย์

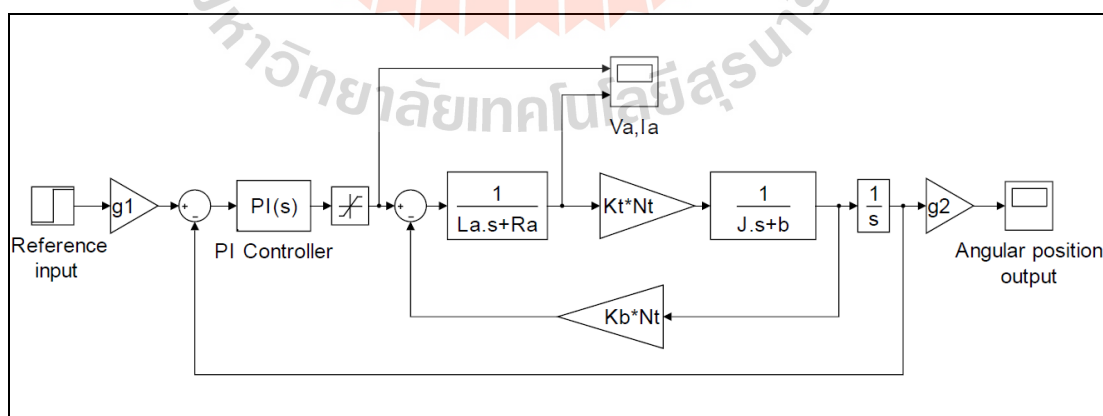
$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left[s \frac{s^4 + 1,597.26s^3 + 13,058.49s^2}{s^4 + 1,597.26s^3 + 13,058.49s^2 + 236.31K_p s + 236.31K_I} \frac{1}{s} \right] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4-5)$$

การหาค่าเหมาะที่สุดให้กับอัตราขยายพีไอ ใช้เทคนิควิธีการ Response Optimization ในโปรแกรม MATLAB/Simulink (Tandan, 2015) โดยกำหนดกรอบของผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัวให้กับตำแหน่งเชิงมุมการหมุนเอาต์พุต โปรแกรมจะหาค่าอัตราขยายพีไอที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเอาต์พุตเป็นไปตามกรอบที่กำหนดไว้ และใช้เทคนิควิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วย Simplex Search Method แผนภาพลี้กการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับอัตราขยายพีไอ ด้วยเทคนิควิธีการ Response Optimization ใน โปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าอินพุตอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบขั้นมีค่าเท่ากับ +90 องศา อัตราขยาย $g_1 = \pi/180$ เปลี่ยนหน่วยของศาเป็นเรเดียน และ $g_2 = 180/\pi$ เปลี่ยนหน่วยเรเดียนเป็นองศา ใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบขับเคลื่อนที่ได้จากการวัดและการระบุเอกลักษณ์ และกำหนดกรอบของผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนเอาต์พุต ดังนี้ เวลาขึ้น (rise time) 9 วินาที เวลาเข้าที่ (settling time) 12 วินาที ค่าพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot) เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady state error) เท่ากับ 0.01 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรแกรมให้ค่าเหมาะที่สุดสำหรับอัตราขยายพีไอของตัวควบคุมแบบพีไอ คือ $K_p = 39.1985$ และ $K_I = 0.0285$

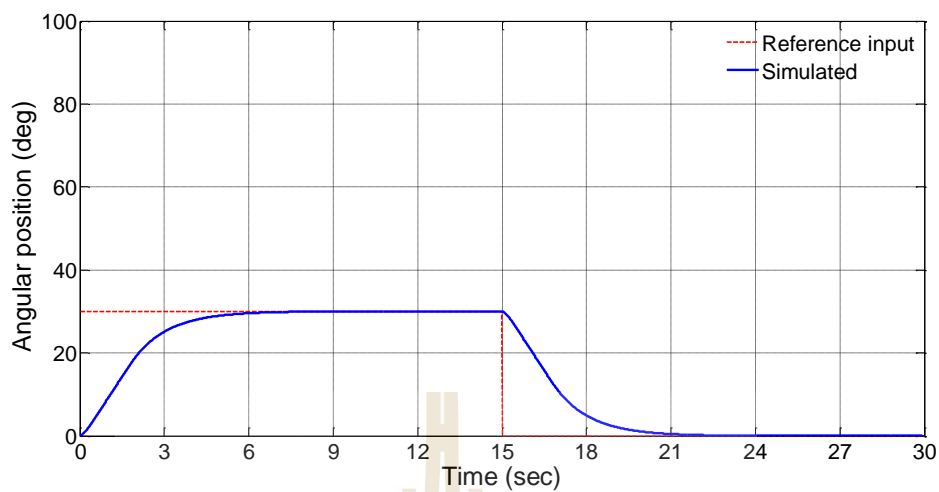


รูปที่ 4.6 แผนภาพบล็อกการหาค่าเหมาะที่สุดของอัตราขยายพีไอ ด้วยวิธีการ
Response Optimization ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

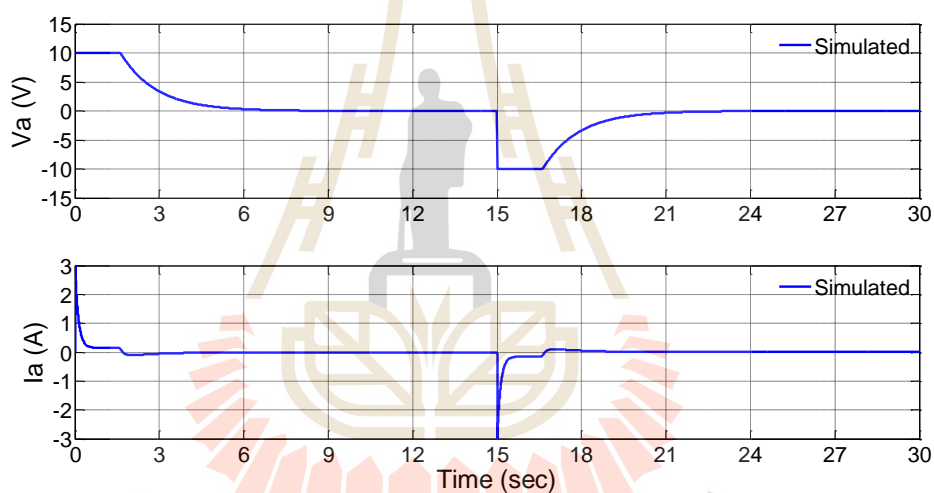
แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 กำหนดอินพุตอ้างอิง (reference input) เป็นตำแหน่งเชิงมุมการหมุนไว้ที่ค่ามุมหมุน ± 30 องศา ± 60 องศา และ ± 90 องศา ตามลำดับ และผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุน (angular position) ของระบบขับเคลื่อน แรงดันอาร์มาเจอร์ (V_a) และกระแสอาร์มาเจอร์ (I_a) สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.8 กราฟรูปที่ 4.9 และกราฟรูปที่ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุน
ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

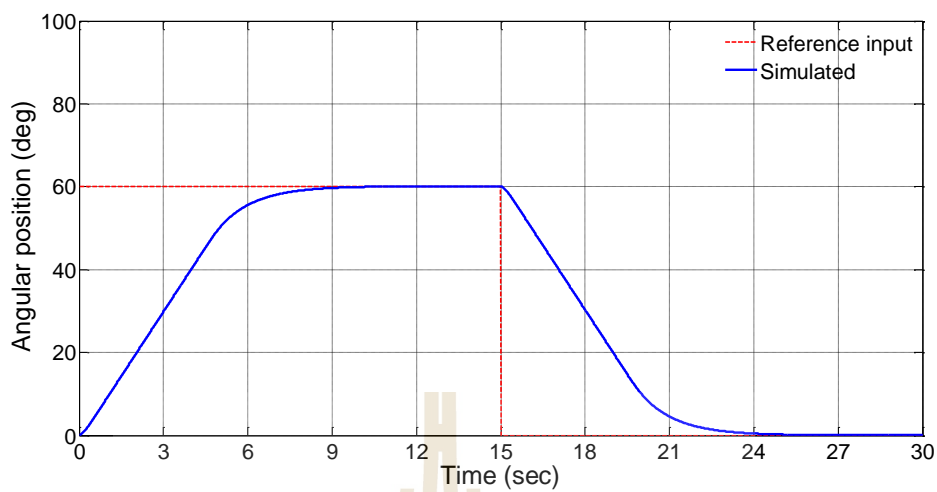


(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน

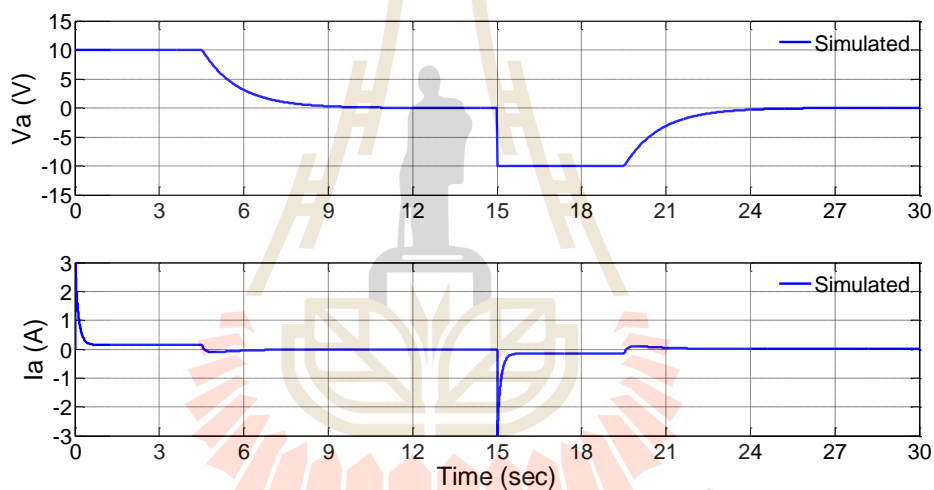


(ข) กราฟผลตอบสนองของแรงดันอาร์มาเจอร์และกระแสอาร์มาเจอร์

รูปที่ 4.8 กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน แรงดันอาร์มาเจอร์ กระแสอาร์มาเจอร์ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

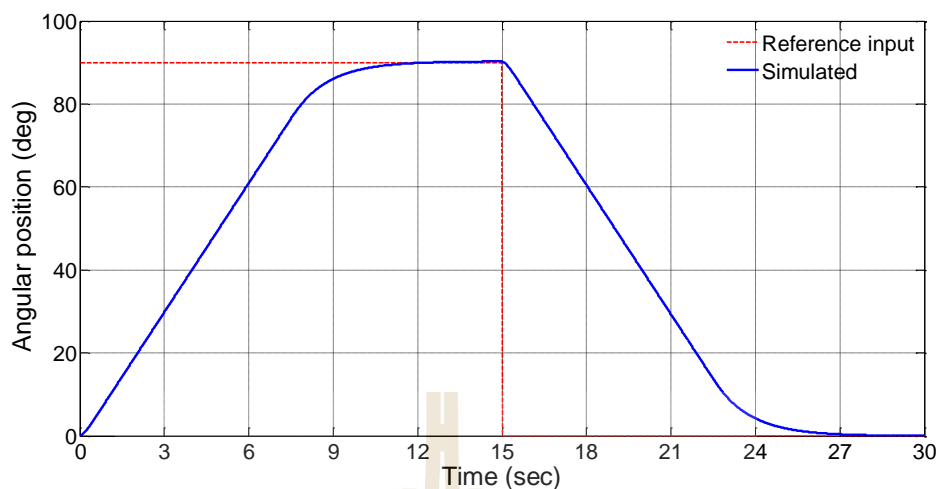


(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน

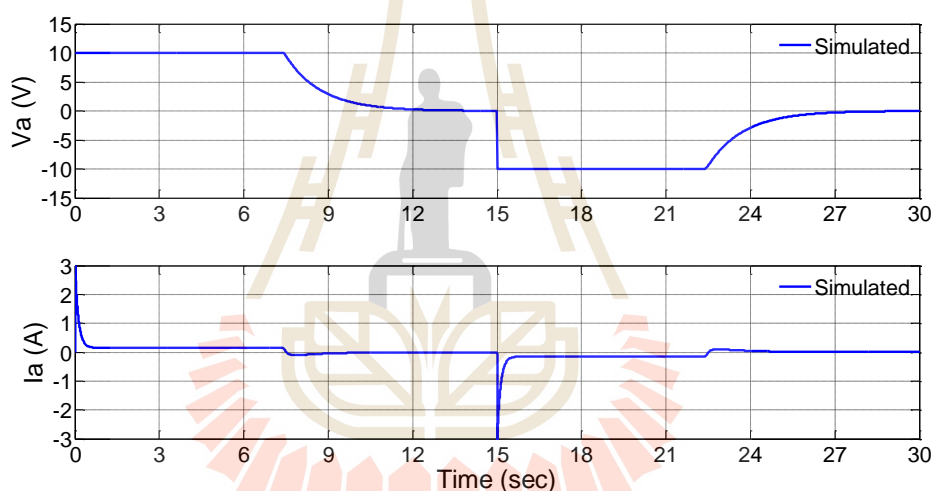


(ข) กราฟผลตอบสนองของแรงดันอาร์มาเจอร์และกระแสอาร์มาเจอร์

รูปที่ 4.9 กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน แรงดันอาร์มาเจอร์ กระแสอาร์มาเจอร์ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ



(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน



(ข) กราฟผลตอบสนองของแรงดันอาร์มาเจอร์และกระแสอาร์มาเจอร์

รูปที่ 4.10 กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน แรงดันอาร์มาเจอร์ กระแสอาร์มาเจอร์ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

จากกราฟรูปที่ 4.8 กราฟรูปที่ 4.9 และกราฟรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน และค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวประมาณเท่ากับศูนย์ ค่าแรงดันอาร์มาเจอร์และกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะอยู่ตัวแล้ว

4.2.3 การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะและใช้วิธีวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบ โดยเทคนิคนี้ใช้ได้กับระบบที่มีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์เท่านั้น และถ้าสามารถวัดค่าตัวแปรสถานะได้ทั้งหมดแล้วทำการป้อนกลับตัวแปรสถานะ จะสามารถวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบไว้ที่ตำแหน่งใด ๆ ได้ พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และระบบมีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว ดังสมการที่ (4-6) และสมการของระบบขับเคลื่อนที่แสดงไว้ในสมการที่ (3-40) และสมการที่ (3-41)

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (4-6)$$

กำหนดให้ตัวแปรสถานะ $x_1 = \alpha_L(t)$, $x_2 = \omega_L(t)$ และ $x_3 = i_a(t)$ ระบบมีสัญญาณเอาต์พุต $y(t) = \alpha_L(t)$ และสัญญาณควบคุม $u(t) = V_a(t)$ เมื่อไม่พิจารณาโหลดจากภายนอกจะสามารถเขียนสมการสถานะของระบบขับเคลื่อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_L(t) &= \omega_L(t) \\ \dot{\omega}_L(t) &= -\frac{b_{3eq}}{J_{3eq}}\omega_L(t) + \frac{N_t K_t}{J_{3eq}}i_a(t) \\ \dot{i}_a(t) &= -\frac{N_t K_b}{L_a}\omega_L(t) - \frac{R_a}{L_a}i_a(t) + \frac{1}{L_a}V_a(t)\end{aligned}\quad (4-7)$$

จากสมการที่ (4-7) เมื่อ $\dot{x}_1(t) = \dot{\alpha}_L(t)$, $\dot{x}_2(t) = \dot{\omega}_L(t)$ และ $\dot{x}_3(t) = \dot{i}_a(t)$ จะได้สมการสถานะของระบบขับเคลื่อน ดังสมการที่ (4-8)

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_{3eq}}{J_{3eq}} & \frac{N_t K_t}{J_{3eq}} \\ 0 & -\frac{N_t K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (4-8)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการที่ (4-8) จะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.3969 & 0.4841 \\ 0 & -25,663.7135 & -1,596.8663 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 488.1144 \end{bmatrix} u(t) \quad (4-9)$$

จากสมการที่ (4-8) และสมการที่ (4-9) จะได้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.3969 & 0.4841 \\ 0 & -25,663.7135 & -1,596.8663 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 488.1144 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0]$$

จากสมการที่ (4-9) ระบบจะมีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อเมทริกซ์สภาพควบคุมได้ ดังสมการที่ (4-10) จะต้องมียาลำดับชั้นเท่ากับลำดับชั้นของเมทริกซ์ระบบ \mathbf{A} โดยตรวจสอบค่าลำดับชั้นได้ด้วยการหาค่ากำหนดของเมทริกซ์ \mathbf{M} ถ้าค่ากำหนดมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าค่าลำดับชั้นมีค่าเท่ากับลำดับชั้นของเมทริกซ์ระบบ \mathbf{A}

$$\mathbf{M} = [\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B}] \quad (4-10)$$

เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ \mathbf{A} และเมทริกซ์ \mathbf{B} ลงในสมการที่ (4-10) จะได้

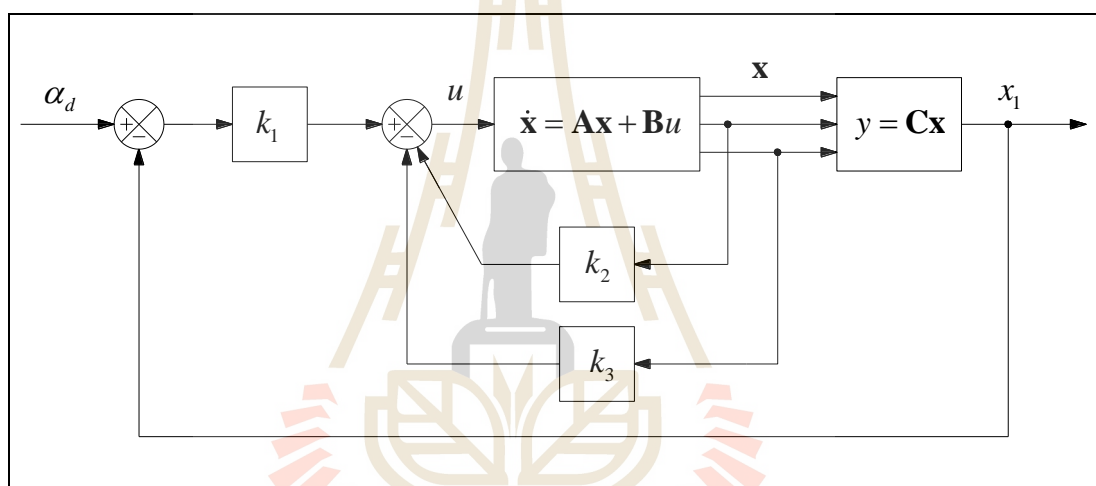
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 236.2961 \\ 0 & 236.2961 & -377,427.1942 \\ 488.1144 & -779,453.4359 & 1,238,618,686.7241 \end{bmatrix}$$

จะเห็นว่า $|\mathbf{M}| = -2.7254 \times 10^7$ เมื่อค่า $|\mathbf{M}| \neq 0$ เพราะฉะนั้นค่าลำดับชั้นของเมทริกซ์ \mathbf{M} มีค่าเท่ากับลำดับชั้นของเมทริกซ์ระบบ และทำให้ระบบมีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์

จากฟังก์ชันถ่ายโอนดังที่แสดงในสมการที่ (2-13) เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขับเรือดั้งสมการที่ (4-11) จะเห็นได้ว่าระบบเป็นระบบประเภทที่ 1 และมีอันดับเท่ากับสาม

$$\begin{aligned}\frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{236.2961}{s^3 + 1,597.2632s^2 + 13,058.4969s} \\ &= \frac{236.2961}{s(s + 1,589.0453)(s + 8.2178)}\end{aligned}\quad (4-11)$$

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ แสดงแผนภาพบล็อกการควบคุม ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ได้ดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า α_d คือตำแหน่งเชิงมุมการหมุนอินพุตอ้างอิง ตัวแปรสถานะจะถูกป้อนกลับผ่านอัตราขยายการป้อนกลับสถานะ k_1 , k_2 และ k_3 ไปยังสัญญาณควบคุม u โดยมีตำแหน่งเชิงมุมการหมุนเอาต์พุต $y = x_1$ และตัวแปรสถานะ $x_1 = \alpha_L$



รูปที่ 4.11 แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

จากรูปที่ 4.11 สัญญาณควบคุมหาค่าได้ดังนี้

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (4-12)$$

$$\begin{aligned}u &= -\begin{bmatrix} 0 & k_2 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + k_1(\alpha_d - x_1) \\ &= -(k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3) + k_1\alpha_d \\ &= -\mathbf{K}\mathbf{x} + k_1\alpha_d\end{aligned}$$

โดยที่ $\mathbf{x}(t)$ คือ เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ
 \mathbf{K} คือ เมทริกซ์อัตราขยายการป้อนกลับสถานะ $[k_1 \ k_2 \ k_3]$
 $\alpha_d(t)$ คือ ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนอินพุตอ้างอิง

เมื่อเราพิจารณาระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบ BIBO เมื่อรากทั้งหมดของสมการลักษณะเฉพาะของระบบวงปิดอยู่ทางด้านซ้ายของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อนเท่านั้น จะใช้วิธีการตรวจสอบเสถียรภาพระบบควบคุมด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของเรทท์ (Routh's stability criterion) ด้วยการเขียนสัมประสิทธิ์ของสมการลักษณะเฉพาะของระบบวงปิดลงในตารางของเรทท์ โดยระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ทุกค่าในหลักแรกของตารางของเรทท์จะต้องมีค่าเป็นจำนวนบวกเท่านั้น

พิจารณาค่าขอบเขตของเมทริกซ์อัตราขยายการป้อนกลับสถานะ \mathbf{K} ที่ทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ โดยที่ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสถานะมีสมการลักษณะเฉพาะดังนี้

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = 0 \quad (4-13)$$

$$\begin{aligned} |s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| &= \begin{vmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.3969 & 0.4841 \\ 0 & -25,663.7135 & -1,596.8663 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 488.1144 \end{vmatrix} [k_1 \ k_2 \ k_3] \\ &= s^3 + (488.11k_3 + 1.59 \times 10^3)s^2 + (236.29k_2 + 193.73k_3 + 1.31 \times 10^4)s + 236.29k_1 \end{aligned}$$

เขียนตารางของเรทท์จากสัมประสิทธิ์ของสมการลักษณะเฉพาะ ได้ดังนี้

s^3	1	$236.29k_2 + 193.73k_3 + 1.31 \times 10^4$
s^2	$488.11k_3 + 1.59 \times 10^3$	$236.29k_1$
s^1	$\frac{(488.11k_3 + 1.59 \times 10^3)(236.29k_2 + 193.73k_3 + 1.31 \times 10^4) - 236.29k_1}{488.11k_3 + 1.59 \times 10^3}$	
s^0	$236.29k_1$	

ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของเรทท์ ก็ต่อเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวในหลักแรกของตารางของเรทท์จะต้องมีค่าเป็นจำนวนบวกเท่านั้น จะได้ k_1 , k_2 และ k_3 ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์แถวที่ 4

$$236.29k_1 > 0 \text{ แล้วจะได้ค่า } k_1 > 0$$

ค่าสัมประสิทธิ์แถวที่ 2

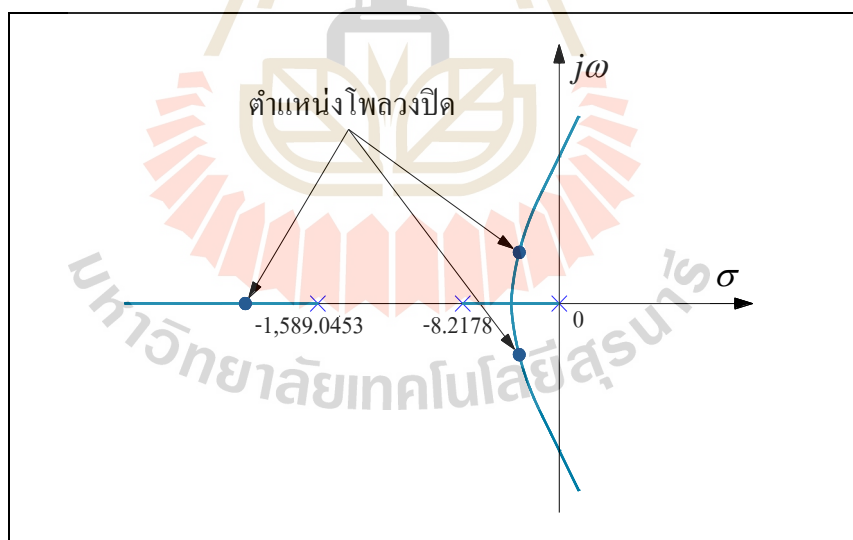
$$488.11k_3 + 1.59 \times 10^3 > 0 \text{ แล้วจะได้ค่า } k_3 > -3.3$$

ค่าสัมประสิทธิ์แถวที่ 3

$$(488.11k_3 + 1.59 \times 10^3)(236.29k_2 + 193.73k_3 + 1.31 \times 10^4) > 236.29k_1$$

$$\text{แล้วจะได้ค่า } k_2 > \frac{236.29k_1 - 9.45 \times 10^4 k_3^2 - 6.69 \times 10^6 k_3 - 2.08 \times 10^6}{1.15 \times 10^5 k_3 + 3.75 \times 10^5}$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขับเร้าในสมการที่ (4-11) จะเห็นได้ว่าตำแหน่งโพลของระบบขับเร้าอยู่ที่ตำแหน่ง $s=0$, $s=-8.2178$ และ $s=-1,589.0453$ โดยการควบคุมวงปิดจะออกแบบให้ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบอยู่ที่ $s=-4+3j$, $s=-4-3j$ และ $s=-2,000$ เพื่อให้ผลตอบสนองชั่วคราวของระบบมีค่าประมาณของอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) $\zeta \approx 0.8$ และความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (undamped natural frequency) $\omega_n \approx 5 \text{ rad/s}$ แผนภาพการวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบขับเร้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนภาพการวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบขับเร้า

เมื่อวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบแล้วจะทำให้ระบบมีสมการลักษณะเฉพาะ ได้ดังนี้

$$(s+4-3j)(s+4+3j)(s+2,000) = s^3 + 2,008s^2 + 16,025s + 50,000 \quad (4-14)$$

การหาค่าเมทริกซ์ \mathbf{K} จะใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ที่แสดงไว้ในสมการที่ (2-33) กำหนดให้ $\phi(s) = s^3 + 2,008s^2 + 16,025s + 50,000$ เพราะฉะนั้นเมทริกซ์ \mathbf{K} หาได้จากสมการที่ (4-15) โดยที่ $\phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^3 + 2,008\mathbf{A}^2 + 16,025\mathbf{A} + 50,000\mathbf{I}$

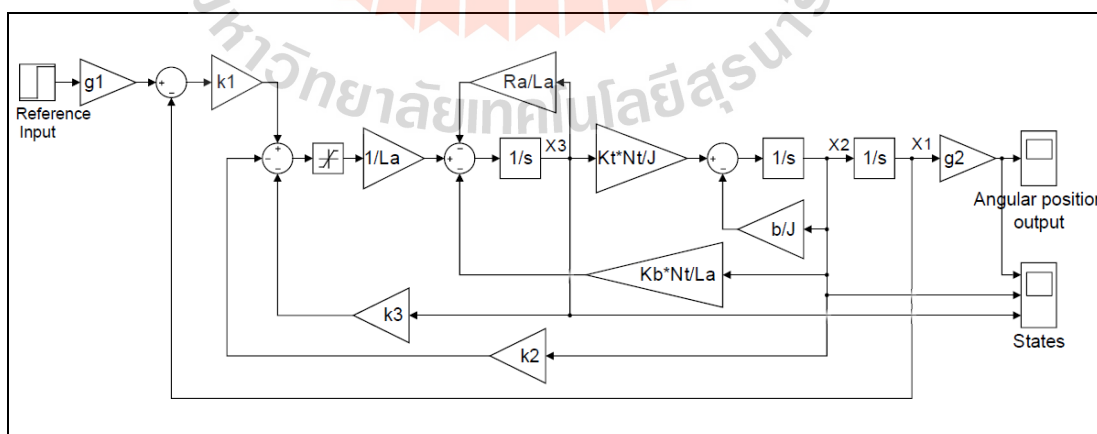
$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ 1] [\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B}]^{-1} \phi(\mathbf{A}) \quad (4-15)$$

$$[\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B}]^{-1} = \begin{bmatrix} 55.2595 & 6.7579 & 0.0021 \\ 6.7596 & 0.0042 & 0 \\ 0.0042 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\phi(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} 50,000 & 2,804.3786 & 198.8376 \\ 0 & -5,054,026.4356 & -316,159.5984 \\ 0 & 16,760,647,294.4155 & 1,037,579,984.0214 \end{bmatrix}$$

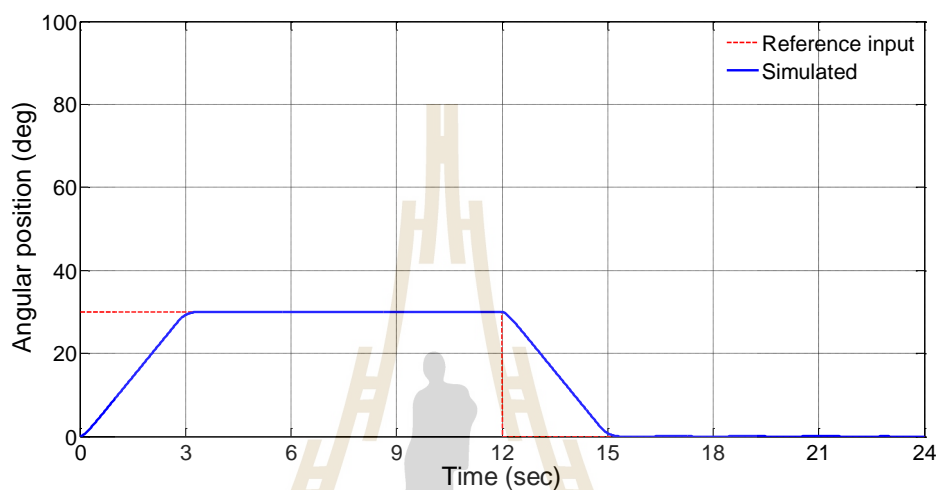
เมทริกซ์อัตราขยายการป้อนกลับสถานะ \mathbf{K} ที่ทำให้ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบถูกวางไว้ในตำแหน่งที่กำหนดได้ ดังนี้ $k_1 = 211.5988$, $k_2 = 11.8681$ และ $k_3 = 0.8415$

การจำลองสถานการณ์ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าอินพุตอ้างอิงเป็นตำแหน่งเชิงมุมการหมุน ตัวแปรสถานะทุกตัวถูกป้อนกลับผ่านอัตราขยายการป้อนกลับสถานะ k_1 , k_2 และ k_3 โดยค่าพารามิเตอร์ $b = b_{3eq}$ และ $J = J_{3eq}$

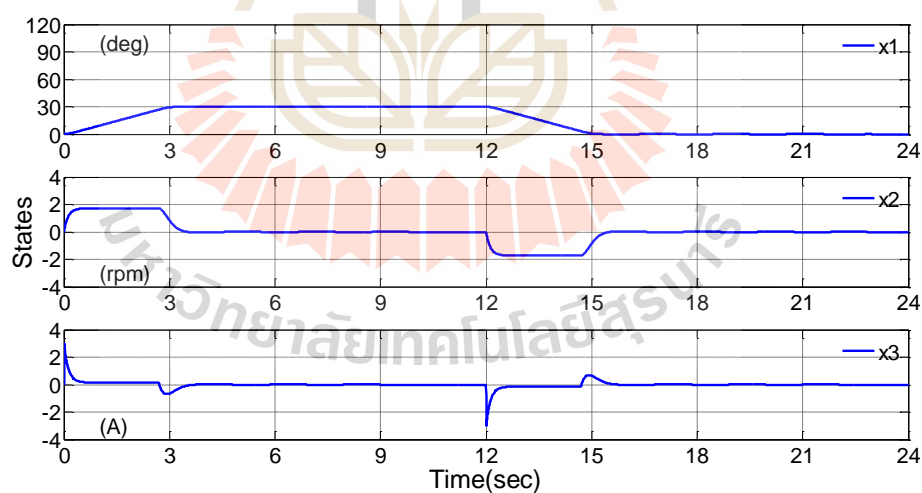


รูปที่ 4.13 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน และตัวแปรสถานะ ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองสถานการณ์ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ โดยกำหนดให้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ± 60 องศา และ ± 90 องศา ตามลำดับ ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.14 กราฟรูปที่ 4.15 และกราฟรูปที่ 4.16 ตามลำดับ

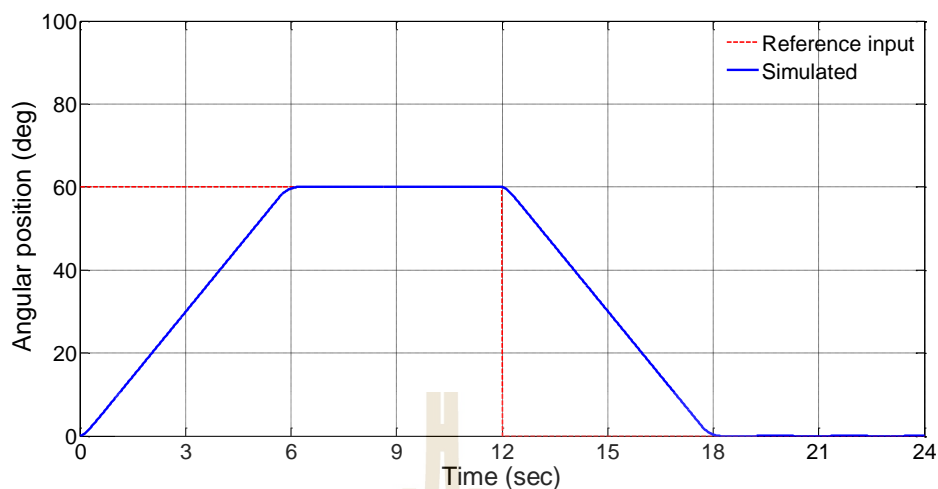


(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน

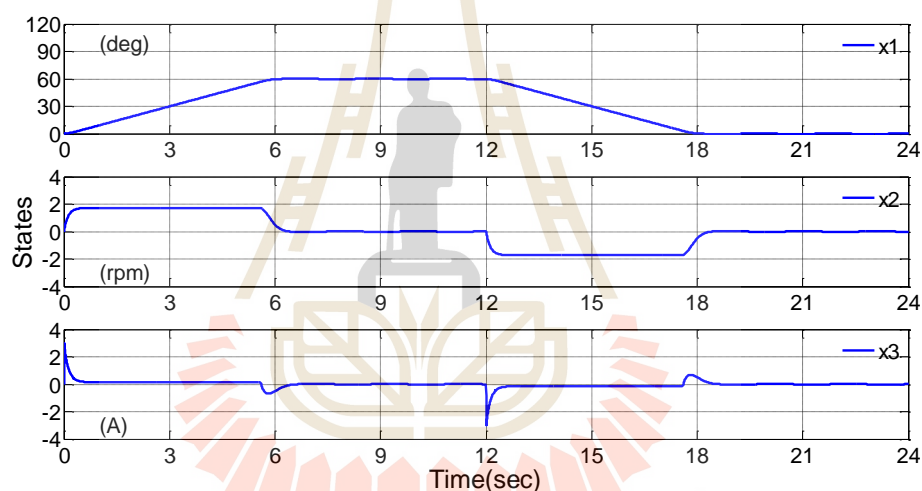


(ข) กราฟผลตอบสนองของตัวแปรสถานะ

รูปที่ 4.14 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ



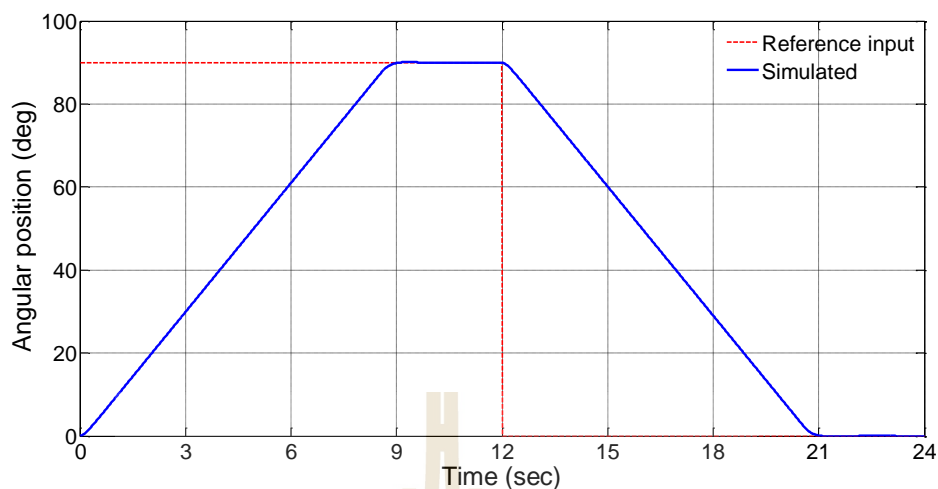
(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน



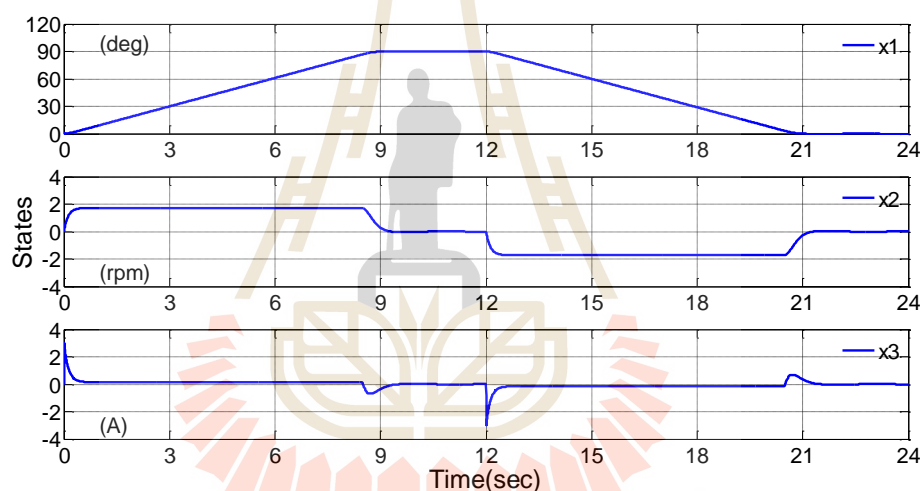
(ข) กราฟผลตอบสนองของตัวแปรสถานะ

รูปที่ 4.15 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

จากกราฟรูปที่ 4.14 กราฟรูปที่ 4.15 และกราฟรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน เกิดค่าฟุ้งเกินเล็กน้อย และค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ โดยที่ค่าตัวแปรสถานะ x_2 และ x_3 จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะอยู่ตัวแล้ว



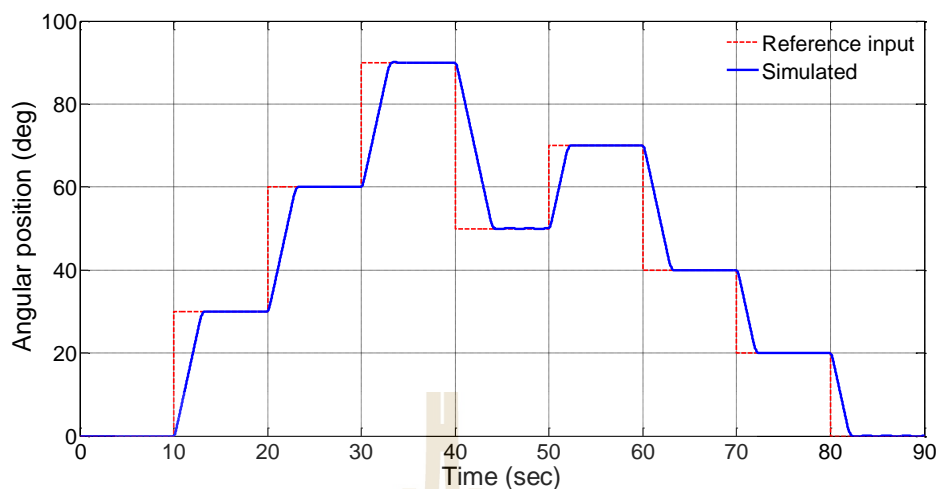
(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน



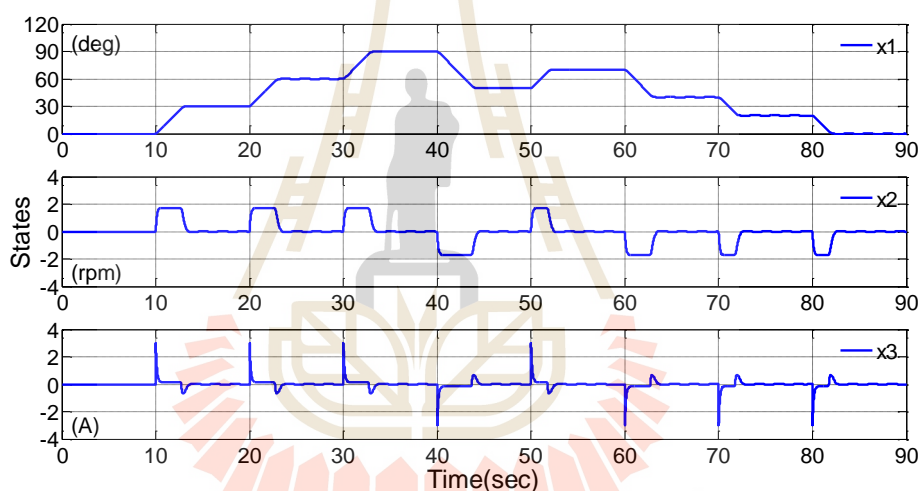
(ข) กราฟผลตอบสนองของตัวแปรสถานะ

รูปที่ 4.16 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ
กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

และการจำลองสถานการณ์ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ โดยกำหนดให้แนววิถีอินพุตอ้างอิงของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.17



(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน



(ข) กราฟผลตอบสนองของตัวแปรสถานะ

รูปที่ 4.17 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

จากกราฟรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนสามารถตามรอยแนววิถีอินพุตอ้างอิงได้ทุกค่า เกิดค่าฟุ้งเกินเล็กน้อย และค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ โดยที่ค่าตัวแปรสถานะ x_2 และ x_3 จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะอยู่ตัวแล้ว

4.2.4 ตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล และใช้การป้อนกลับสถานะผ่านค่าอัตราขยายป้อนกลับสถานะที่เหมาะสม โดยระบบพลวัตดังกล่าวจะต้องสามารถตรวจวัดค่าตัวแปรสถานะได้ทุกตัว แต่ในกรณีนี้จะไม่ตรวจวัดค่าตัวแปรสถานะทั้งหมด เพราะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อตัวตรวจรู้และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโดยไม่จำเป็น จะใช้วิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะแทน การประมาณค่าตัวแปรสถานะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนค่าตัวแปรสถานะจริง เมื่อได้ค่าประมาณของตัวแปรสถานะแล้วก็ทำการป้อนกลับผ่านอัตราขยายป้อนกลับสถานะที่ได้คำนวณไว้ โดยวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะทุกตัว เราเรียกว่าตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

จากสมการสถานะที่แสดงไว้ในสมการที่ (2-34) ระบบพลวัตจะมีสภาพสังเกตได้อย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อเมทริกซ์สภาพสังเกตได้ดังในสมการที่ (4-16) จะต้องมียาลำดับชั้นเท่ากับลำดับชั้นของเมทริกซ์ระบบ A โดยจะตรวจสอบค่าลำดับชั้นได้ด้วยการหาค่ากำหนดของเมทริกซ์ N ถ้าค่ากำหนดมีค่าไม่เท่ากับศูนย์แสดงว่าค่าลำดับชั้นมีค่าเท่ากับลำดับชั้นของเมทริกซ์ระบบ

$$N = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ A และเมทริกซ์ C ลงในสมการที่ (4-16) จะได้

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.3969 & 0.4841 \end{bmatrix}$$

จะเห็นได้ว่า $|N| = 0.4814$ และค่า $|N| \neq 0$ เพราะฉะนั้นค่าลำดับชั้นของเมทริกซ์ N มีค่าเท่ากับลำดับชั้นของเมทริกซ์ระบบ และแสดงได้ว่าระบบมีสภาพสังเกตได้อย่างสมบูรณ์

พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาที่มีสมการสถานะดังในสมการที่ (2-34) การออกแบบตัวสังเกตจะใช้เวกเตอร์ \hat{x} เป็นเวกเตอร์ประมาณค่าตัวแปรสถานะ และเพิ่มพจน์ค่าผิดพลาดของการประมาณเข้าไปชดเชยความไม่ถูกต้องของเมทริกซ์ A และเมทริกซ์ B โดยค่าผิดพลาดของการประมาณจะได้จากค่าแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ได้จากการวัดคือ y กับเอาต์พุตที่ได้จากการประมาณค่าคือ \hat{y} ทำการป้อนกลับผ่านเมทริกซ์อัตราขยายตัวสังเกต L เพราะฉะนั้นสมการตัวสังเกตสถานะ จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-17)

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}(y(t) - \tilde{y}(t)) \\ \tilde{y}(t) &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(t)\end{aligned}\quad (4-17)$$

โดยที่ $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ คือ เวกเตอร์ตัวแปรสถานะของตัวสังเกต

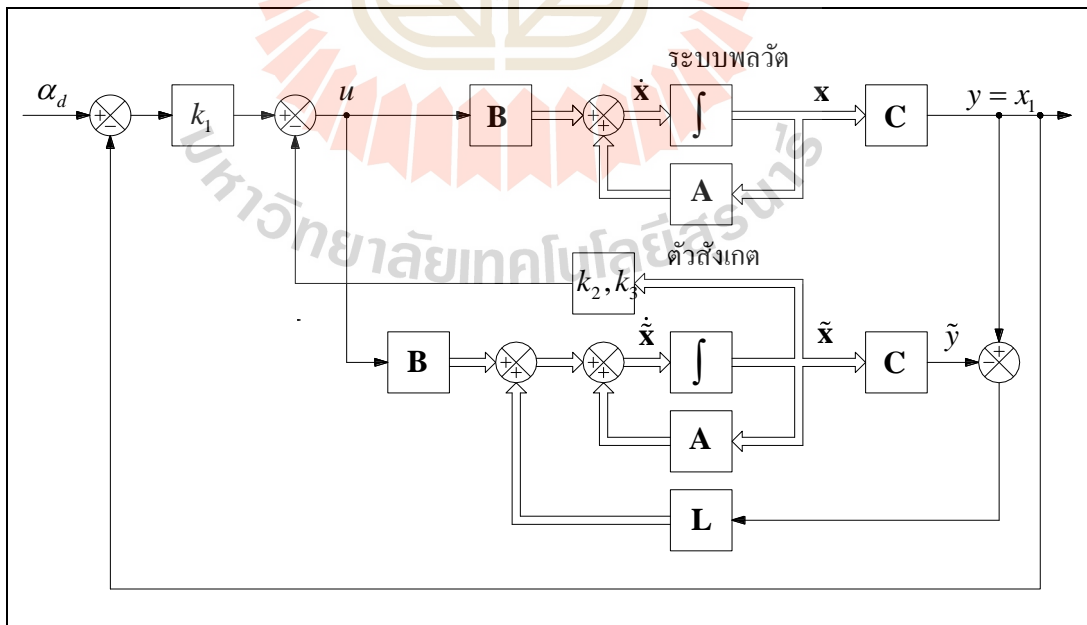
\mathbf{L} คือ เมทริกซ์อัตราขยายตัวสังเกต $[l_1; l_2; l_3]^T$

$\tilde{y}(t)$ คือ เอาต์พุตที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกต

จากสมการที่ (4-7) และสมการที่ (4-17) สามารถเขียนสมการของตัวสังเกตสถานะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_1(t) &= \tilde{x}_2(t) + l_1(y(t) - \tilde{y}(t)) \\ \dot{\tilde{x}}_2(t) &= -\frac{b_{3eq}}{J_{3eq}}\tilde{x}_2(t) + \frac{N_t K_t}{J_{3eq}}\tilde{x}_3(t) + l_2(y(t) - \tilde{y}(t)) \\ \dot{\tilde{x}}_3(t) &= -\frac{N_t K_b}{L_a}\tilde{x}_2(t) - \frac{R_a}{L_a}\tilde{x}_3(t) + \frac{1}{L_a}u(t) + l_3(y(t) - \tilde{y}(t))\end{aligned}\quad (4-18)$$

แผนภาพบล็อกการออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าแตกต่าง $y - \tilde{y}$ จะถูกป้อนกลับผ่านเมทริกซ์ \mathbf{L} และค่าตัวแปรสถานะ $\tilde{\mathbf{x}}$ จะถูกป้อนกลับผ่านอัตราขยายป้อนกลับสถานะ k_1, k_2 และ k_3



รูปที่ 4.18 แผนภาพบล็อกการออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ
ร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

จากสมการที่ (4-6) ลบออกด้วยสมการที่ (4-16) จะได้

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)) - \mathbf{L}(y(t) - \tilde{y}(t)) \\ y(t) - \tilde{y}(t) &= \mathbf{C}(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t))\end{aligned}\quad (4-19)$$

โดยที่ $\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}$ เป็นค่าแตกต่างระหว่างเวกเตอร์สถานะจริงกับเวกเตอร์สถานะที่ได้จากการประมาณค่า และ $y - \tilde{y}$ เป็นค่าแตกต่างระหว่างเอาต์พุตจริงกับเอาต์พุตที่ได้จากการประมาณค่า กำหนดให้ $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}$ จากสมการที่ (4-19) จะได้สมการค่าผิดพลาดตัวสังเกต ดังนี้

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\mathbf{e}(t) \quad (4-20)$$

เราพิจารณาระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และใช้วิธีการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบควบคุมด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของเราที่ เช่นเดียวกันกับค่าขอบเขตของเมทริกซ์อัตราขยายการป้อนกลับสถานะ การหาค่าขอบเขตของเมทริกซ์อัตราขยายตัวสังเกตสถานะ \mathbf{L} ที่ทำให้ระบบควบคุมยังมีเสถียรภาพ ซึ่งระบบควบคุมของตัวสังเกตสถานะมีสมการลักษณะเฉพาะ ได้ดังนี้

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{LC}| = 0 \quad (4-21)$$

$$\begin{aligned}|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{LC}| &= \begin{vmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.3969 & 0.4841 \\ 0 & -25,663.7135 & -1,596.8663 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \\ &= s^3 + (l_1 + 1.59 \times 10^3)s^2 + (1.59 \times 10^3 l_1 + l_2 + 1.31 \times 10^4)s + 1.31 \times 10^4 l_1 + 1.59 \times 10^3 l_2 + 0.48 l_3\end{aligned}$$

เขียนตารางของเราที่จากสัมประสิทธิ์ของสมการลักษณะเฉพาะดังนี้

s^3	1	$1.59 \times 10^3 l_1 + l_2 + 1.31 \times 10^4$
s^2	$l_1 + 1.59 \times 10^3$	$1.31 \times 10^4 l_1 + 1.59 \times 10^3 l_2 + 0.48 l_3$
s^1	$\frac{(l_1 + 1.59 \times 10^3)(1.59 \times 10^3 l_1 + l_2 + 1.31 \times 10^4) - 1.31 \times 10^4 l_1 + 1.59 \times 10^3 l_2 + 0.48 l_3}{l_1 + 1.59 \times 10^3}$	
s^0	$1.31 \times 10^4 l_1 + 1.59 \times 10^3 l_2 + 0.48 l_3$	

ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของเราที่ ต่อเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวในหลักแรกของตารางของเราที่จะต้องมีค่าเป็นจำนวนบวกเท่านั้น จะได้ l_1 , l_2 และ l_3 ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์แถวที่ 2

$$l_1 + 1.59 \times 10^3 > 0 \text{ แล้วจะได้ค่า } l_1 > -1.59 \times 10^3$$

ค่าสัมประสิทธิ์แถวที่ 4

$$1.31 \times 10^4 l_1 + 1.59 \times 10^3 l_2 + 0.48 l_3 > 0 \text{ แล้วจะได้ค่า } l_3 > \frac{-1.31 \times 10^4 l_1 - 1.59 \times 10^3 l_2}{0.48}$$

ค่าสัมประสิทธิ์แถวที่ 3

$$(l_1 + 1.59 \times 10^3)(1.59 \times 10^3 l_1 + l_2 + 1.31 \times 10^4) - 1.31 \times 10^4 l_1 + 1.59 \times 10^3 l_2 + 0.48 l_3 > 0$$

$$\text{แล้วจะได้ค่า } l_2 > \frac{-1.59 \times 10^3 l_1^2 - 2.56 \times 10^6 l_1 - 2.08 \times 10^7}{l_1 + 1.59 \times 10^3}$$

การออกแบบตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ จะกำหนดตำแหน่งโพลวงปิดของตัวสังเกตไว้ที่ตำแหน่ง $s = -500 + 500j$, $s = -500 - 500j$ และ $s = -2,000$ เพื่อให้ผลตอบสนองชั่วคราวของตัวสังเกตมีค่าประมาณของอัตราส่วนการหน่วง $\zeta \approx 0.7$ และความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง $\omega_n \approx 707 \text{ rad/s}$ เพราะฉะนั้นตัวสังเกตจะมีสมการลักษณะเฉพาะได้ดังนี้

$$(s + 500 - 500j)(s + 500 + 500j)(s + 2,000) = s^3 + 3 \times 10^3 s^2 + 2.5 \times 10^6 s + 1 \times 10^9 \quad (4-22)$$

การหาเมทริกซ์อัตราขยายตัวสังเกตจะใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ที่แสดงในสมการที่ (2-47) และกำหนดให้ $\phi(s) = s^3 + 3 \times 10^3 s^2 + 2.5 \times 10^6 s + 1 \times 10^9$ เพราะฉะนั้นเมทริกซ์ L จะหาได้ดังสมการที่ (4-23) โดยที่ $\phi(A) = A^3 + 3 \times 10^3 A^2 + 2.5 \times 10^6 A + 1 \times 10^9 I$

$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ A และเมทริกซ์ C จะได้

$$\phi(A) = \begin{bmatrix} 1,000,000,000 & 2,486,385.6538 & 679.0648 \\ 0 & 981,585,826.8805 & 119,283.4648 \\ 0 & -6,323,603,939.0448 & 588,211,727.4383 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.8199 & 2.0657 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4-23) จะได้เมทริกซ์ \mathbf{L} ที่จะทำให้ตำแหน่งโพลวงปิดของตัวสังเกตถูกวางไว้ตามตำแหน่งที่กำหนดได้ ดังนี้ $l_1 = 1,402.7368$, $l_2 = 246,402.5301$ และ $l_3 = 1,215,062,440.4841$

เมื่อใช้การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับแล้ว จะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมได้ จากรูปที่ 4.18 กำหนดให้สัญญาณควบคุม $u = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}$ และสมการตัวสังเกตสถานะในสมการที่ (4-17) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= (\mathbf{A} - \mathbf{LC} - \mathbf{BK})\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{L}y(t) \\ u(t) &= -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}(t) \end{aligned} \quad (4-24)$$

จากสมการที่ (4-24) เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะได้สมการตัวสังเกตสถานะ ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \\ \dot{\tilde{x}}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1,402.74 & 1 & 0 \\ -246,401.63 & -0.39 & 0.48 \\ -1,215,078,727.57 & -31,454.41 & -2,007.61 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,402.74 \\ 246,402.53 \\ 1,215,062,440.48 \end{bmatrix} y \\ u &= -[211.5836 \quad 11.8634 \quad 0.8415] \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ดำเนินการแปลงลาปลาซสมการที่ (4-24) และกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นเท่ากับศูนย์จะได้

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{X}}(s) &= (s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{LC} + \mathbf{BK})^{-1} \mathbf{L}Y(s) \\ U(s) &= -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{X}}(s) \end{aligned} \quad (4-25)$$

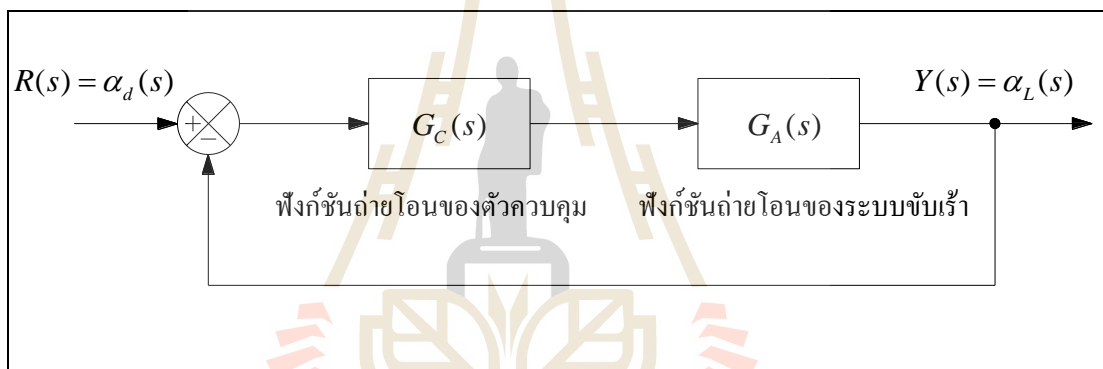
จากสมการที่ (4-25) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม ดังนี้

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{-Y(s)} = \mathbf{K}(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{LC} + \mathbf{BK})^{-1} \mathbf{L} \quad (4-26)$$

จากสมการที่ (4-26) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G_C(s) = \frac{1,025,696,190.96s^2 + 7,261,461,076.25s + 211,598,799,988.33}{s^3 + 3,410.75s^2 + 3,079,139.12s + 1,105,421,911.29}$$

แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขับเคลื่อน $G_A(s)$ เป็นระบบประเภทที่ 1 มีอันดับเท่ากับสาม ดังสมการที่ (4-11) และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ $G_C(s)$ เป็นระบบประเภทที่ 0 มีอันดับเท่ากับสาม

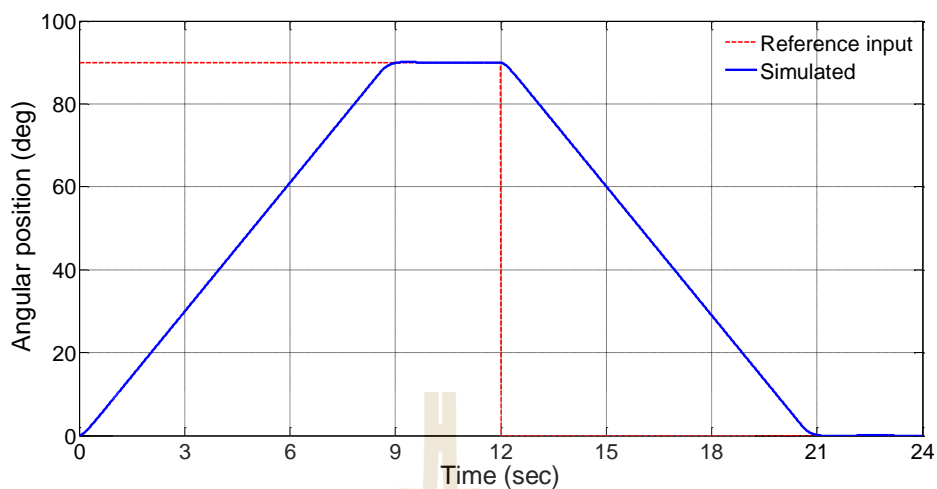


รูปที่ 4.19 แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน

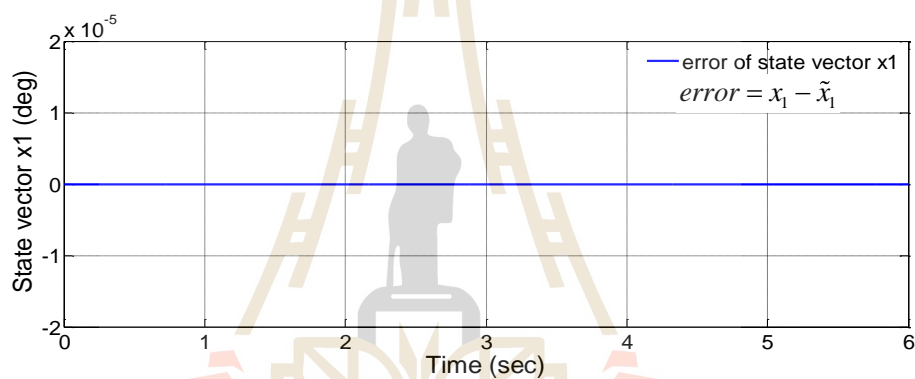
จากรูปที่ 4.19 ระบบขับเคลื่อนจะมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ที่มีเอาต์พุตเป็นตำแหน่งเชิงมุมการหมุน $\alpha_L(s)$ และอินพุตเป็นตำแหน่งเชิงมุมการหมุน $\alpha_d(s)$ ได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{\alpha_L(s)}{\alpha_d(s)} = \frac{2.42 \times 10^{11} s^2 + 1.72 \times 10^{12} s + 5 \times 10^{13}}{s^6 + 5 \times 10^3 s^5 + 8.54 \times 10^6 s^4 + 6.07 \times 10^9 s^3 + 2.05 \times 10^{12} s^2 + 1.61 \times 10^{13} s + 5 \times 10^{13}}$$

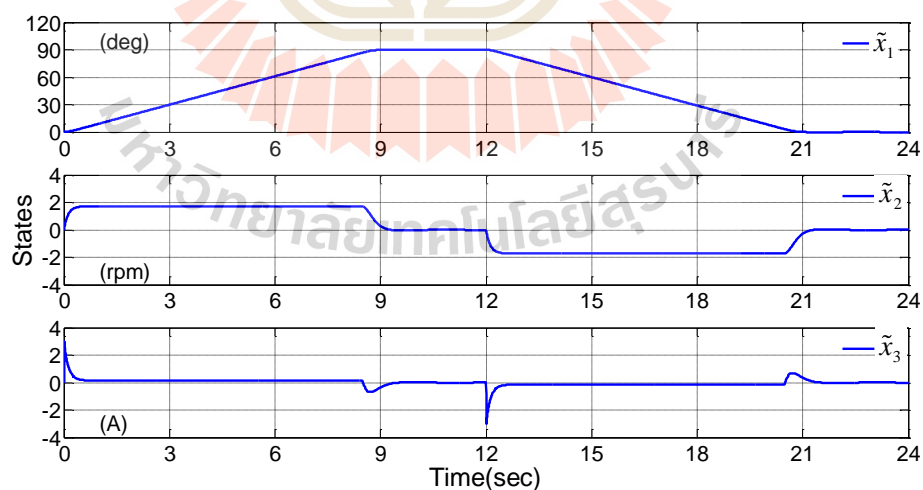
การจำลองสถานการณ์การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน ด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 4.20



(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน



(ข) กราฟค่าผิดพลาดระหว่างตัวแปรสถานะกับการประมาณค่าตัวแปรสถานะ x_1



(ค) กราฟผลตอบสนองของตัวแปรสถานะ

รูปที่ 4.21 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

4.2.5 การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ

การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วย ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ โดยที่ระบบขับเคลื่อนมีสภาพควบคุมได้อย่างสมบูรณ์และมีสภาพสังเกตได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อได้ออกแบบอัตราขยายป้อนกลับสถานะ \mathbf{K} และอัตราขยายตัวสังเกตสถานะ \mathbf{L} ของระบบควบคุมแล้ว ต้องทำการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบด้วย

ระบบระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา มีสมการสถานะดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}$$

การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ กำหนดให้ $u = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}$ และค่าแตกต่างระหว่างเวกเตอร์สถานะจริงกับเวกเตอร์สถานะจากตัวสังเกต $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)$ จะได้

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{BK}\tilde{\mathbf{x}}(t) \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) + \mathbf{BK}(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)) \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) + \mathbf{BK}\mathbf{e}(t)\end{aligned}\tag{4-27}$$

จากสมการที่ (4-20) สมการค่าผิดพลาดของตัวสังเกต และเขียนใหม่อีกครั้ง

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\mathbf{e}(t)\tag{4-28}$$

จากสมการที่ (4-27) และสมการที่ (4-28) จะได้สมการทางพลวัตของระบบที่ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_T \\ \dot{\mathbf{e}}_T \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{BK} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} - \mathbf{LC} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_T} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_T \\ \mathbf{e}_T \end{bmatrix}\tag{4-29}$$

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา จะอาศัยหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทเลียปูนอฟ (Lyapunov stability theorem) (Gopal, 2010) กำหนดให้ $V(\mathbf{x})$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องและเป็นฟังก์ชันสเกลาร์ โดยระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาจะมีเสถียรภาพต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- (i) $V(\mathbf{x}) > 0, \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$
- (ii) $V(\mathbf{0}) = 0$
- (iii) $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$

เมื่อพิจารณาระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาดังสมการที่ (4-29) จะได้

$$\dot{\mathbf{x}}_T(t) = \mathbf{A}_T \mathbf{x}_T(t) \quad (4-30)$$

สมการที่ (4-30) ระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาจะมีเสถียรภาพวงกว้างเชิงเส้นกำกับ (globally asymptotically stable) รอบจุดกำเนิด ก็ต่อเมื่อแต่ละเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน เมทริกซ์ \mathbf{Q} (symmetric positive definite matrix) ที่ทำให้เกิดเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน เมทริกซ์ \mathbf{P} หนึ่งเดียว โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-31)

$$\mathbf{A}_T^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_T = -\mathbf{Q} \quad (4-31)$$

เมทริกซ์ \mathbf{Q} เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน และกำหนดให้เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) ดังนี้

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4-29) เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ต่าง ๆ จะได้เมทริกซ์ระบบ \mathbf{A}_T ดังนี้

$$\mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.3969 & 0.4841 & 0 & 0 & 0 \\ -103,284.4213 & -31,456.7041 & -2,007.6145 & 103,284.4213 & 5,792.9905 & 410.7482 \\ 0 & 0 & 0 & -1,402.7368 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -246,402.5301 & -0.3969 & 0.4841 \\ 0 & 0 & 0 & -1,215,062,440.4841 & -25,663.7135 & -1,596.8663 \end{bmatrix}$$

โดยเมทริกซ์ \mathbf{A}_T มีค่าเฉพาะ (eigenvalues) ทั้งหมดอยู่ด้านซ้ายบนแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน และกำหนดให้เมทริกซ์ \mathbf{P} เป็นเมทริกซ์สมมาตร ดังนี้

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{12} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{15} & p_{25} & p_{35} & p_{45} & p_{55} & p_{56} \\ p_{16} & p_{26} & p_{36} & p_{46} & p_{56} & p_{66} \end{bmatrix}$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-31) เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ \mathbf{A}_T และเมทริกซ์ \mathbf{Q} แล้ว จะได้เมทริกซ์ \mathbf{P} ดังนี้

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 168.8519 & 53.2296 & 4.80 \times 10^{-6} & -425.4767 & 6.1538 & 6.33 \times 10^{-5} \\ 53.2296 & 22.1322 & 1.42 \times 10^{-3} & -139.8648 & 1.1716 & 1.73 \times 10^{-4} \\ 4.80 \times 10^{-6} & 1.42 \times 10^{-3} & 2.49 \times 10^{-4} & -9.6467 & -4.15 \times 10^{-3} & 2.79 \times 10^{-5} \\ -425.4767 & -139.8648 & -9.6467 & 117,279,272.5104 & 749.3307 & -135.5466 \\ 6.1538 & 1.1716 & -4.15 \times 10^{-3} & 749.3307 & 374.7164 & 0.0224 \\ 6.33 \times 10^{-5} & 1.73 \times 10^{-4} & 2.79 \times 10^{-5} & -135.5566 & 0.0224 & 3.27 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

โดยเมทริกซ์ \mathbf{P} มีค่าเฉพาะทั้งหมดมากกว่าศูนย์ เพราะฉะนั้นเมทริกซ์ \mathbf{P} เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน และเมื่อพิจารณาฟังก์ชันเลียปูนอฟ $V(\mathbf{x}_T)$ ดังสมการที่ (4-32)

$$V(\mathbf{x}_T) = \mathbf{x}_T^T \mathbf{P} \mathbf{x}_T \quad (4-32)$$

กำหนดให้ $V(\mathbf{x}) > 0$, $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ และ $V(\mathbf{0}) = 0$ ดำเนินการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟ $V(\mathbf{x}_T)$ และเมื่อพิจารณาระบบเชิงเส้นดังสมการที่ (4-30) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}_T) &= \dot{\mathbf{x}}_T^T \mathbf{P} \mathbf{x}_T + \mathbf{x}_T^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}}_T \\ &= (\mathbf{A}_T \mathbf{x}_T)^T \mathbf{P} \mathbf{x}_T + \mathbf{x}_T^T \mathbf{P} (\mathbf{A}_T \mathbf{x}_T) \\ &= \mathbf{x}_T^T \mathbf{A}_T^T \mathbf{P} \mathbf{x}_T + \mathbf{x}_T^T \mathbf{P} \mathbf{A}_T \mathbf{x}_T \\ &= \mathbf{x}_T^T (\mathbf{A}_T^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_T) \mathbf{x}_T \\ &= -\mathbf{x}_T^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_T \end{aligned} \quad (4-33)$$

เมื่อเมทริกซ์ \mathbf{Q} เป็นเมทริกซ์ที่เป็นบวกแน่นอน และ $\dot{V}(\mathbf{x}_T)$ เป็นลบแน่นอน โดยที่ขนาด (norm) ของ \mathbf{x}_T จะหาได้จากสมการที่ (4-34)

$$\|\mathbf{x}_T\| = (\mathbf{x}_T^T \mathbf{P} \mathbf{x}_T)^{1/2} \quad (4-34)$$

เพราะฉะนั้นแล้วจะได้

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}_T) &= \|\mathbf{x}_T\|^2 \\ V(\mathbf{x}_T) &\rightarrow \infty \text{ เมื่อ } \|\mathbf{x}_T\| \rightarrow \infty \end{aligned}$$

ดังนั้น ระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ดังสมการที่ (4-29) หรือระบบควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ เมื่อดำเนินการวิเคราะห์หาคำตอบด้วยทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟแล้ว จะได้ว่าระบบดังกล่าวมีเสถียรภาพวงกว้างเชิงเส้นกำกับรอบจุดกำเนิด

4.3 การออกแบบตัวควบคุมของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave, v) ที่ระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch, θ) และแนวแกน z (Roll, ϕ) ที่มุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และ ± 30 มิลลิเรเดียน โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กถูกขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อน 3 ชุด เพื่อให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนไหวได้ ควบคุมด้านในเป็นการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน ส่วนควบคุมด้านนอกเป็นการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก จะใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล เพื่อให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถตามรอยแนววิถีอ้างอิงและคงค่าเอาต์พุตได้

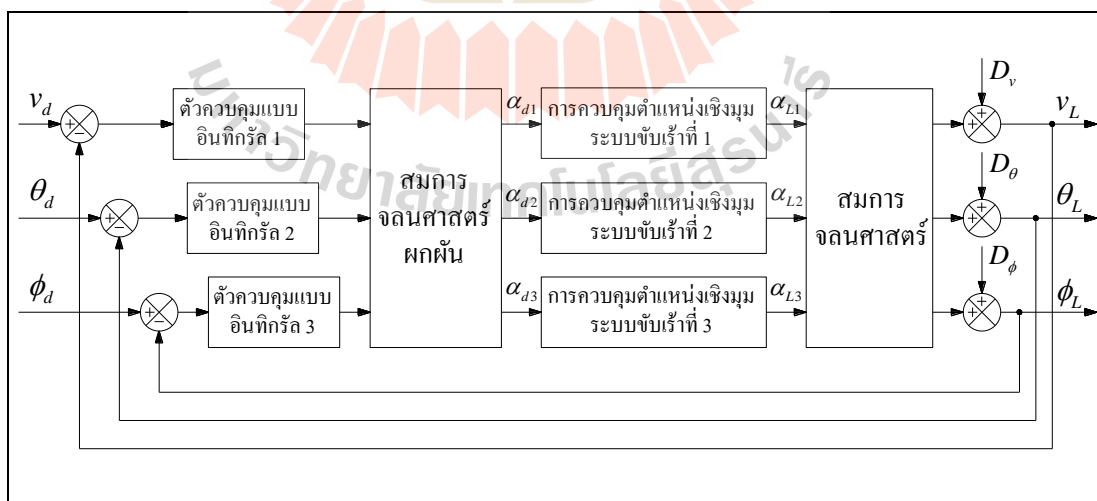
4.3.1 การควบคุมระบบแท่นรองรับแม่เหล็กด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

การออกแบบตัวควบคุมจะอาศัยสมการจลนศาสตร์ผกผันคำนวณค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 โดยตัวควบคุมของระบบขับเคลื่อนจะปรับให้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนเอาต์พุตมีค่าเท่ากับอินพุตอ้างอิงที่ได้จากสมการจลนศาสตร์ผกผัน เมื่อตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนไหวจะทำการตรวจวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z และใช้ป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิง โดยค่าผิดพลาด

ที่เกิดขึ้นระหว่างอินพุตอ้างอิงกับเอาต์พุตจะถูกส่งเข้าตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมให้กับสมการจลนศาสตร์ผกผัน เพื่อปรับค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าใหม่ เพื่อให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของเอาต์พุตมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์

การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหวดัดโนมติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ แสดงได้ดังแผนภาพบล็อกในรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าระบบมีอินพุตอ้างอิงคือ v_d , θ_d และ ϕ_d ใช้สมการจลนศาสตร์ผกผัน ดังสมการที่ (3-26) คำนวณค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3 (รูปควบคุมด้านใน) ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ และใช้สมการจลนศาสตร์ ดังสมการที่ (3-22) แทนตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก เอาต์พุตของระบบคือ v_L , θ_L และ ϕ_L แล้วทำการป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิง โดยรูปควบคุมด้านนอกใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล 1, 2 และ 3 (integral controllers) นอกจากนี้ระบบยังมีการรับกวนจากภายนอกคือ D_v , D_θ และ D_ϕ เข้ามาในระบบอีกทาง

การหาอัตราขยายอินทิกรัล K_{I1} , K_{I2} และ K_{I3} จะใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิควิธีการ Response Optimization ในโปรแกรม MATLAB/Simulink และกำหนดกรอบของผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่และในสถานะอยู่ตัวของเอาต์พุตระบบไว้ โปรแกรมจะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของอัตราขยายอินทิกรัลที่ทำให้ผลตอบสนองเอาต์พุตระบบเป็นไปตามกรอบที่กำหนดไว้ และจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้กับอัตราขยายอินทิกรัล ด้วย Simplex Search Method (Tippayawannakorn, 2013 และ Nayak, 2017)



รูปที่ 4.22 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมการเคลื่อนไหวดัดโนมติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ

4.3.2 การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กตามรูปที่ 3.1 รูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน $y(v)$ การหมุนรอบแนวแกน $x(\theta)$ และแนวแกน $z(\phi)$ กำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x} = [v \ \theta \ \phi]^T$ และเวกเตอร์ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่และการหมุน $\tilde{\mathbf{x}}$ ดังนี้

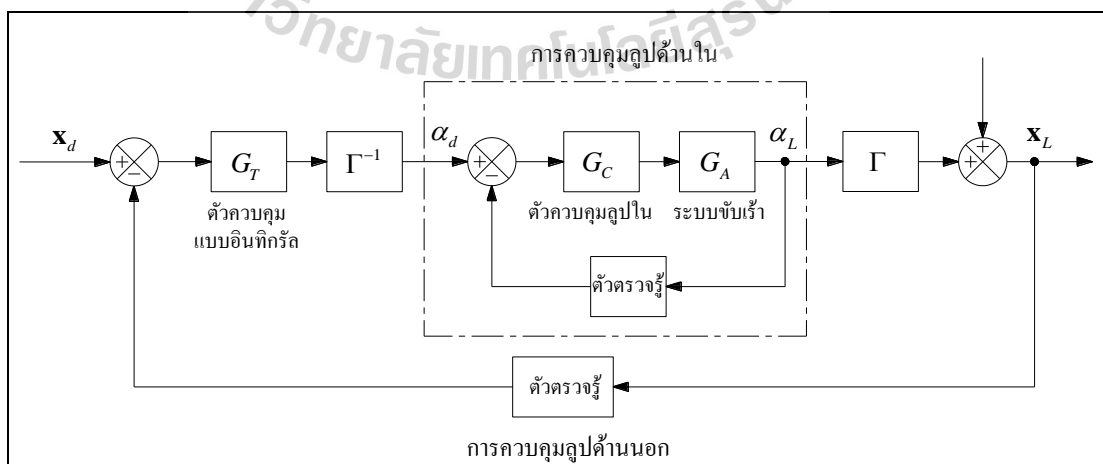
$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_L \quad (4-35)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{v} \\ \tilde{\theta} \\ \tilde{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ \theta_d \\ \phi_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_L \\ \theta_L \\ \phi_L \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4-35) การออกแบบตัวควบคุมต้องสามารถทำให้ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่และการหมุนมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ให้ได้ เมื่อเวลาเข้าสู่อนันต์

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{x}} = \lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{v} \ \tilde{\theta} \ \tilde{\phi}]^T = 0 \quad (4-36)$$

จากรูปที่ 4.22 สามารถเขียนแผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ได้ดังรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าการควบคุมลูบด้านในเป็นการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน และการควบคุมลูบด้านนอกเป็นการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

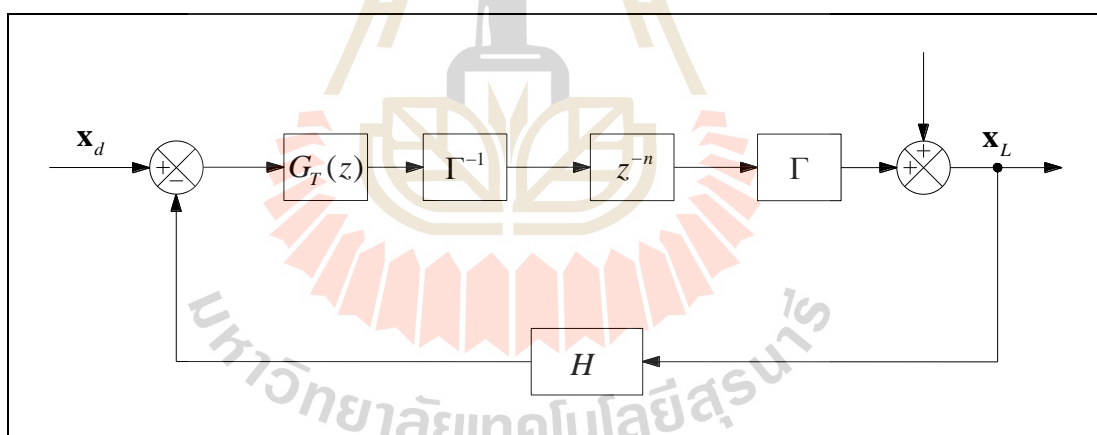


รูปที่ 4.23 แผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

กำหนดให้ Γ^{-1} คือสมการจลนศาสตร์ผกผัน Γ คือสมการจลนศาสตร์ G_T คือตัวควบคุมแบบอินทิกรัล x_d คืออินพุตอ้างอิง และ x_L คือเอาต์พุตของระบบ โดยที่การควบคุมลูปด้านในจะประมาณให้เป็นอิสระต่อการควบคุมลูปด้านนอก เมื่อพิจารณาระบบแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) และกำหนดเงื่อนไขให้การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร็ว ดังนี้

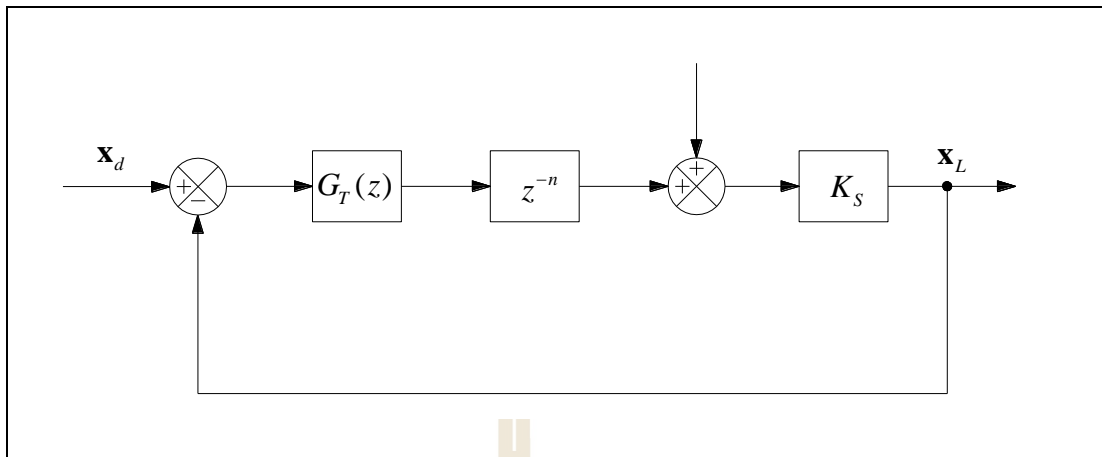
$$\alpha_L(k) = \alpha_d(k-1) \quad (4-37)$$

การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร็วอยู่ภายใต้ระบบควบคุมที่มีเสถียรภาพแล้ว จะประมาณให้การควบคุมดังกล่าวเป็นการประวิงเวลา (time delay) โดยค่าเวลาประวิงของระบบขับเร็วจะได้จากการทดลองจริง พิจารณาระบบแบบเวลาไม่ต่อเนื่องและกำหนดช่วงเวลาการชักตัวอย่าง (sampling time, S_p) ไว้เท่ากับ 0.001 วินาที จากรูปที่ 4.23 จะสามารถเขียนแผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวยของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง และการประวิงเวลาของระบบขับเร็ว แสดงได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวยของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง และการประวิงเวลาของระบบขับเร็ว

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนอยู่ในรูป z โดเมน $G_T(z)$ คือตัวควบคุมแบบอินทิกรัล H คือตัวตรวจรู้ และ z^{-n} คือเวลาประวิงของระบบขับเร็ว และค่า n คือจำนวนเท่าของช่วงเวลาการชักตัวอย่าง จากรูปที่ 4.24 สามารถเขียนแผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวยของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง และการประวิงเวลาของระบบ ได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวนៃของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก
แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง และการประวิงเวลาของระบบ

จะเห็นได้ว่า Γ^{-1} และ Γ รวมกันได้ค่าประมาณให้เท่ากับหนึ่ง K_S คือเมทริกซ์อัตราขยายของตัวตรวจรู้ ทั้งนี้ นอกจากระบบขับเคลื่อนมีการประวิงเวลาแล้ว การเคลื่อนที่และการหมุนของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กยังเกิดการประวิงเวลาขึ้นอีกด้วย

การควบคุมรูปด้านนอกจะใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ซึ่งมีสมการของตัวควบคุมได้ดังสมการที่ (4-38) กำหนดให้ K_I คือเมทริกซ์อัตราขยายของอินทิกรัล

$$G_T(z) = S_p \frac{K_I}{z-1} \quad (4-38)$$

กำหนดให้เมทริกซ์อัตราขยายของอินทิกรัล ดังนี้

$$K_I = \begin{bmatrix} K_{I1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{I2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{I3} \end{bmatrix}$$

และกำหนดให้เมทริกซ์อัตราขยายของตัวตรวจรู้ ดังนี้

$$K_S = \begin{bmatrix} K_v & 0 & 0 \\ 0 & K_\theta & 0 \\ 0 & 0 & K_\phi \end{bmatrix}$$

จากการทดสอบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน จะได้อัตราเวลาประวิงประมาณ 0.1 วินาที และการทดสอบการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก จะได้อัตราเวลาประวิงของระบบประมาณ 0.45 วินาที (แสดงไว้ในบทที่ 5) เพราะฉะนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีค่า $n = 450$ ดังสมการที่ (4-39)

$$(z^{451} - z^{450} + S_p K_I K_S) x_L(z) = S_p K_I K_S x_d(z) \quad (4-39)$$

การทำอินเวอร์สฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของ z โดเมน ให้อยู่ในรูปของปริภูมิสถานะ

$$x_L(k+451) - x_L(k+450) - S_p K_I K_S x_L(k) = S_p K_I K_S x_d(k) \quad (4-40)$$

จากสมการที่ (4-43) จะได้สมการสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่องของระบบดังนี้

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} x_L(k+1) \\ x_L(k+2) \\ \vdots \\ x_L(k+450) \\ x_L(k+451) \end{bmatrix}}_{x_{k+1}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & I \\ -S_p K_I K_S & 0 & 0 & \cdots & 0 & I \end{bmatrix}}_{A_k} \underbrace{\begin{bmatrix} x_L(k) \\ x_L(k+1) \\ \vdots \\ x_L(k+449) \\ x_L(k+450) \end{bmatrix}}_{x_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ S_p K_I K_S \end{bmatrix}}_{B_k} \underbrace{x_d(k)}_{u_k} \\ y(k) &= \underbrace{\begin{bmatrix} I & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{C_k} \underbrace{\begin{bmatrix} x_L(k) \\ x_L(k+1) \\ \vdots \\ x_L(k+449) \\ x_L(k+450) \end{bmatrix}}_{x_k} \end{aligned} \quad (4-41)$$

เมทริกซ์ x_{k+1} มีขนาดมิติ $1,353 \times 1$ เมทริกซ์ A_k มีขนาดมิติ $1,353 \times 1,353$ เมทริกซ์ x_k มีขนาดมิติ $1,353 \times 1$ เมทริกซ์ B_k มีขนาดมิติ $1,353 \times 3$ เมทริกซ์ u_k มีขนาดมิติ 3×1 เมทริกซ์ C_k มีขนาดมิติ $3 \times 1,353$ และเมทริกซ์ I คือเมทริกซ์เอกลักษณ์มีขนาดมิติ 3×3

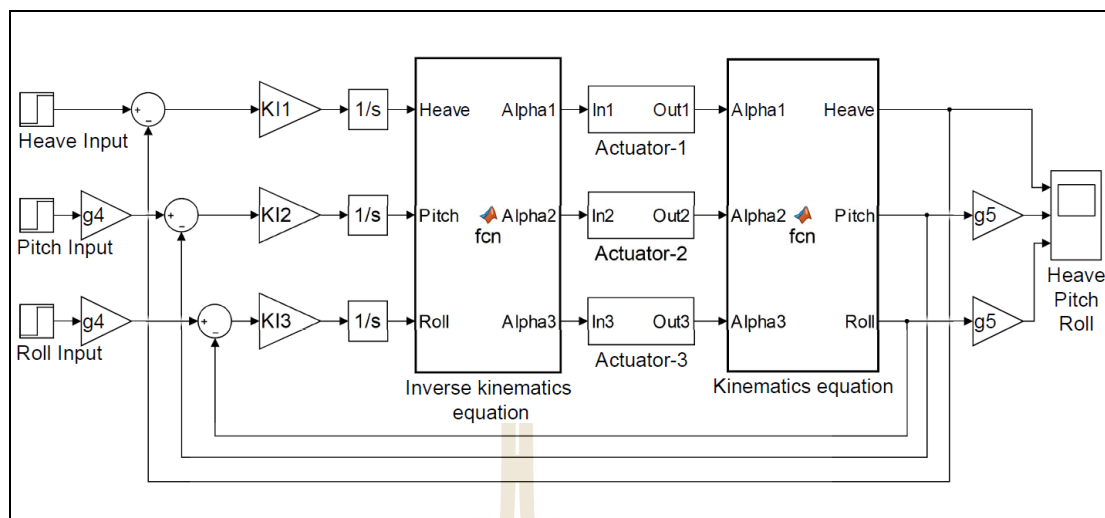
จากสมการที่ (4-39) และสมการที่ (4-41) ใช้การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยที่ระบบพลวัตจะมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (asymptotically stable) ก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ระบบ A_k มีขนาดของค่าเฉพาะ (magnitude of eigenvalues) ทุกค่าน้อยกว่าหนึ่ง โดยผลจากการคำนวณเมื่อค่าอัตราขยาย $K_r K_s < 3$ จะทำให้ขนาดของค่าเฉพาะของเมทริกซ์ระบบ A_k ทุกค่าน้อยกว่าหนึ่ง ดังนั้น ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กจะมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับได้ ก็ต่อเมื่ออัตราขยาย $K_r K_s$ ต้องมีค่าน้อยกว่าสาม (Gopal, 2010 และ Eduardo, 2011)

4.3.3 การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง

การควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง (reference trajectory tracking) เป็นการกำหนดแนววิถีอ้างอิงของการเคลื่อนไหวไว้และกำหนดให้เป็นอินพุตอ้างอิง ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z จากนั้นระบบควบคุมจะปรับตัวเองเพื่อให้ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามแนววิถีอ้างอิงที่กำหนดไว้ การควบคุมแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงจะยังไม่พิจารณาการรบกวนจากภายนอก โดยแผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ จะอ้างอิงตามรูปที่ 4.22 กำหนดให้การรบกวนจากภายนอก D_v , D_θ และ D_ϕ มีค่าเท่ากับศูนย์

การจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และใช้สมการจลนศาสตร์ผกผันดังสมการที่ (3-26) คำนวณค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 ใช้การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน ดังแผนภาพในรูปที่ 4.20 และใช้สมการจลนศาสตร์ดังสมการที่ (3-22) แทนตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 4.26

การหาค่าอัตราขยายอินทิกรัล K_{i1} , K_{i2} และ K_{i3} ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิควิธีการ Response Optimization ใน โปรแกรม MATLAB/Simulink และกำหนดกรอบของผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่และในสถานะอยู่ตัวของเอาต์พุตระบบไว้ และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วย Simplex Search Method จากรูปที่ 4.26 กำหนดให้อินพุตอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบขั้น ดังนี้ การเคลื่อนที่ในแนวแกน y +6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x +20 มิลลิเรเดียน และแนวแกน z +30 มิลลิเรเดียน ค่าอัตราขยาย $g_4=0.001$ และอัตราขยาย $g_5=1,000$ และกำหนดให้กรอบของผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบ ดังนี้ เวลาขึ้น 10 วินาที เวลาเข้าที่ 20 วินาที ค่าพุงเกินสูงสุดเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ และค่าผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.01 เปอร์เซนต์



รูปที่ 4.26 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหว
แบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ
ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

จำลองสถานการณ์หาค่าเหมาะที่สุดของอัตราขยายอินทิกรัล โดยเริ่มต้นที่การเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ตามลำดับ โปรแกรมจะให้ค่าเหมาะที่สุดของอัตราขยายอินทิกรัล ที่ทำให้ผลตอบสนองเอาต์พุตระบบเป็นไปตามกรอบที่กำหนดไว้ ดังนี้ $K_{I1} = 0.4024$, $K_{I2} = 0.4026$ และ $K_{I3} = 0.4021$ ตามลำดับ

จากนั้นดำเนินการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ผลการจำลองสถานการณ์มีดังนี้

กราฟรูปที่ 4.27 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง +6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

กราฟรูปที่ 4.28 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง -6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

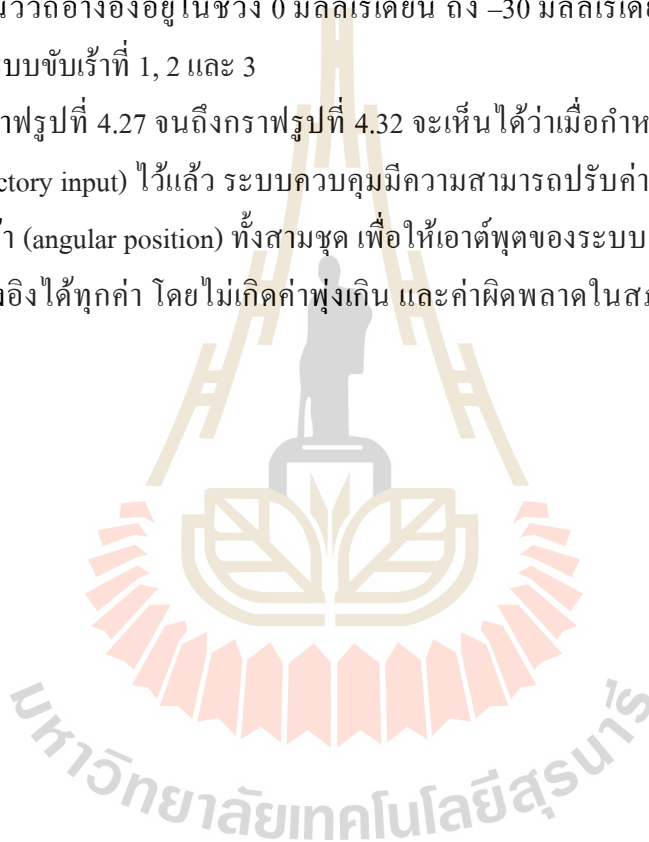
กราฟรูปที่ 4.29 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

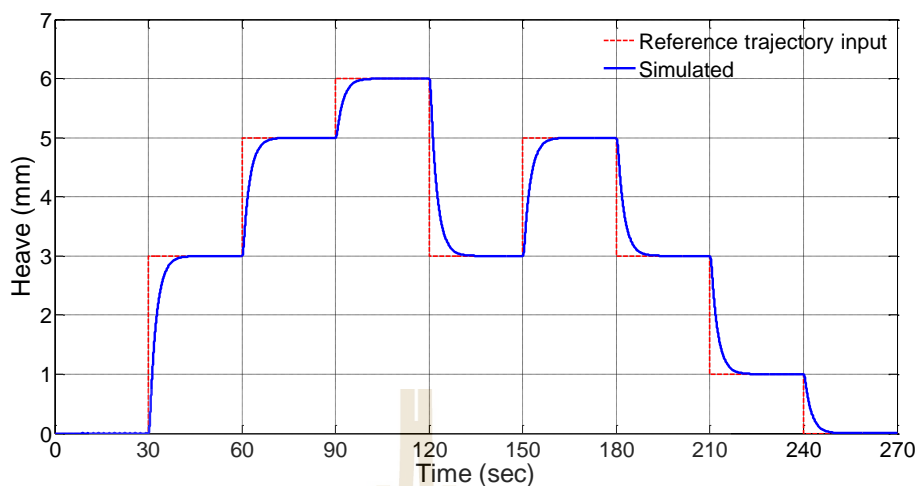
กราฟรูปที่ 4.30 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3

กราฟรูปที่ 4.31 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3

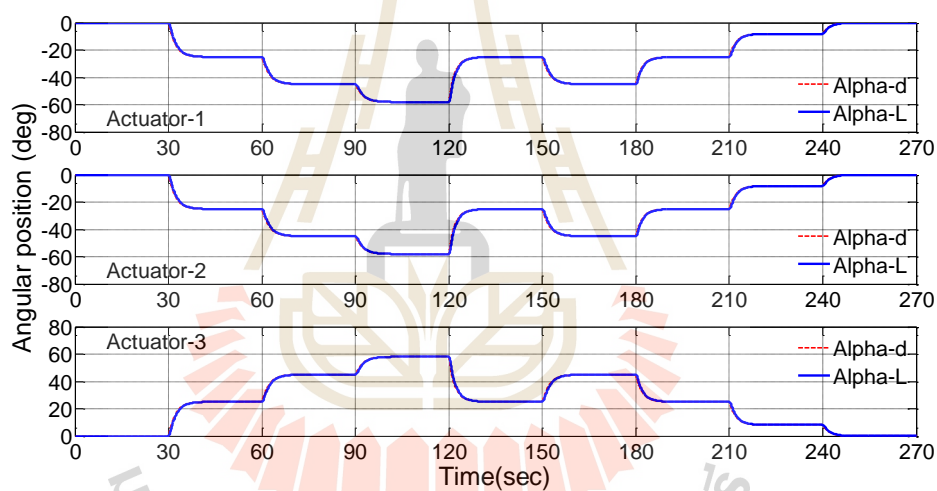
กราฟรูปที่ 4.32 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3

จากกราฟรูปที่ 4.27 จนถึงกราฟรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิง (reference trajectory input) ไว้แล้ว ระบบควบคุมมีความสามารถปรับค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้า (angular position) ทั้งสามชุด เพื่อให้เอาต์พุตของระบบ (simulated) สามารถตามรอยแนววิถีอ้างอิงได้ทุกค่า โดยไม่เกิดค่าพุ่งเกิน และค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์



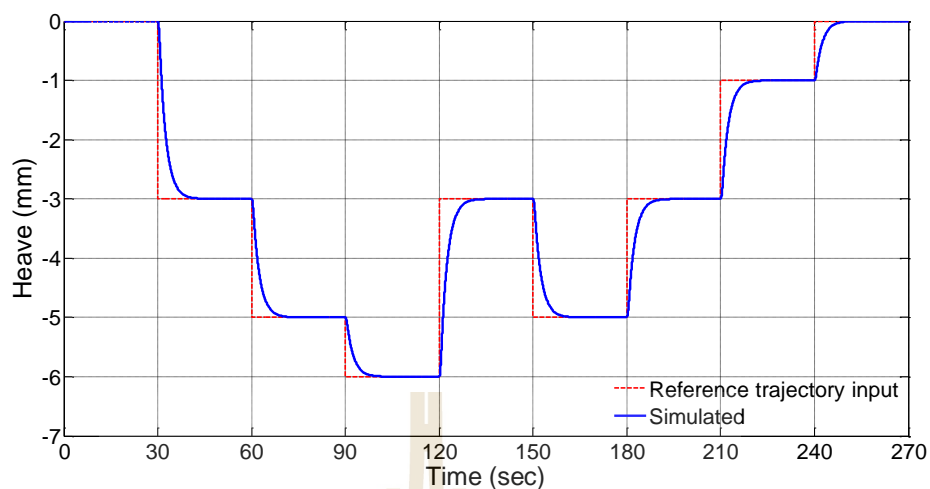


(ก) กราฟการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ระยะเคลื่อนที่อยู่ในช่วง 0 ถึง +6 มิลลิเมตร

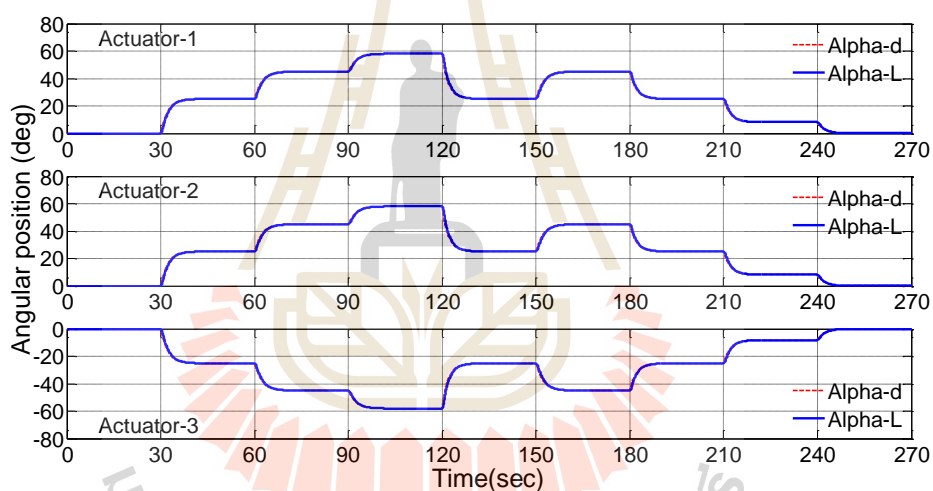


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.27 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง +6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

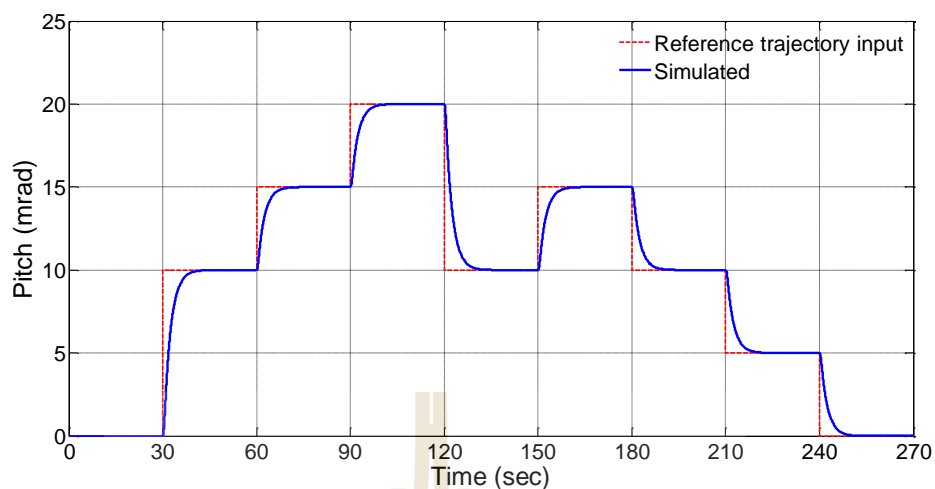


(ก) กราฟการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ระยะเคลื่อนที่อยู่ในช่วง 0 ถึง -6 มิลลิเมตร

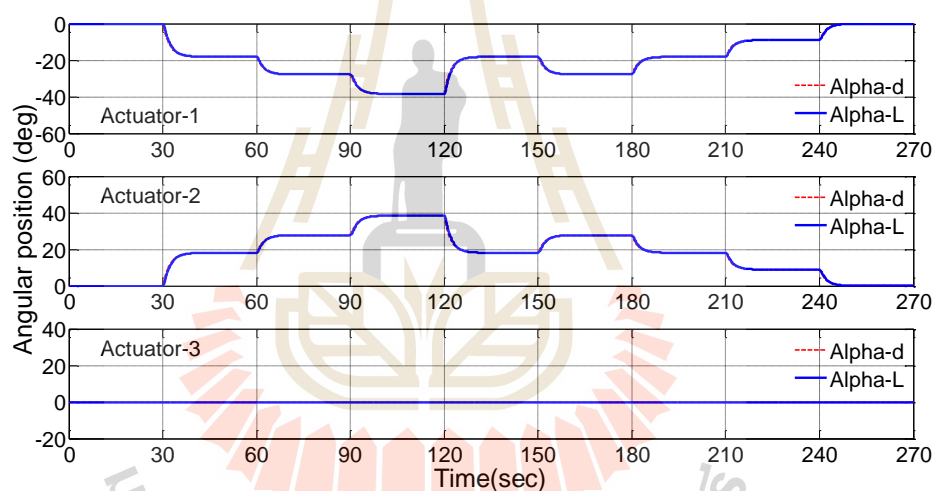


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.28 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง -6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

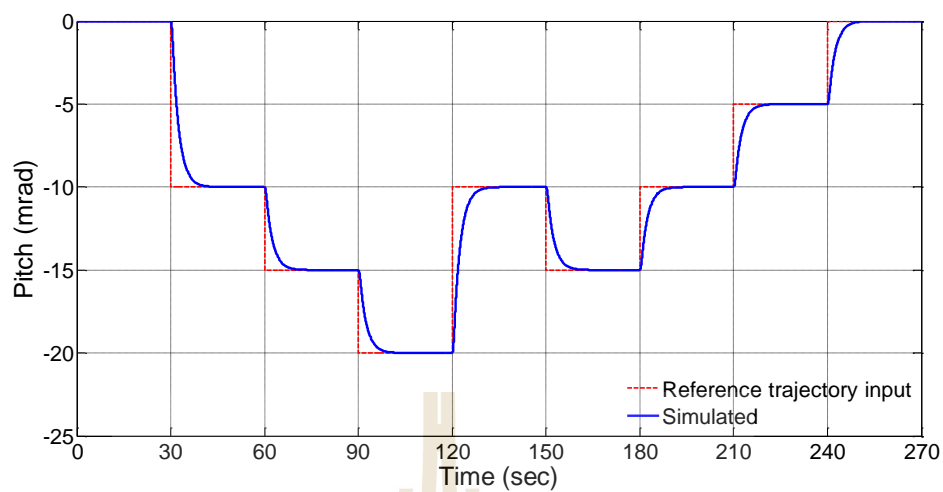


(ก) กราฟการหมุนรอบแนวแกน x มุมหมุนอยู่ในช่วง 0 ถึง +20 มิลลิเรเดียน

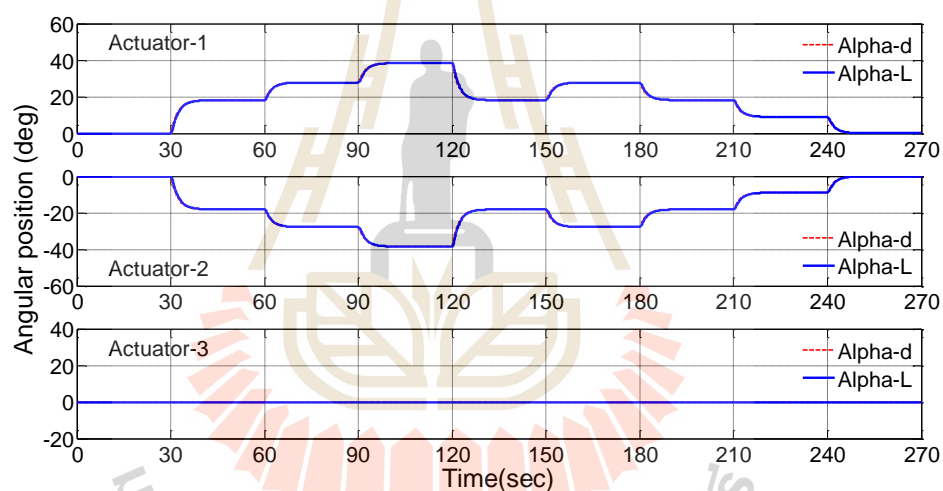


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.29 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3



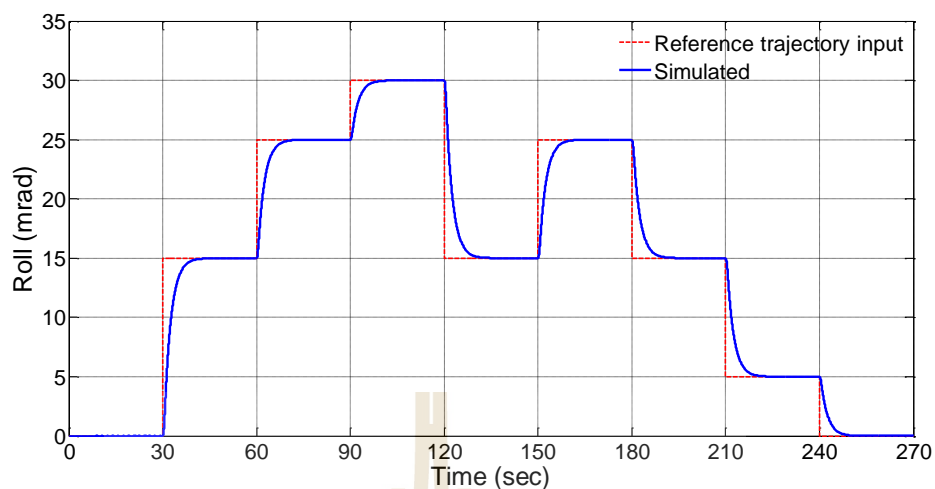
(ก) กราฟการหมุนรอบแนวแกน x มุมหมุนอยู่ในช่วง 0 ถึง -20 มิลลิเรเดียน



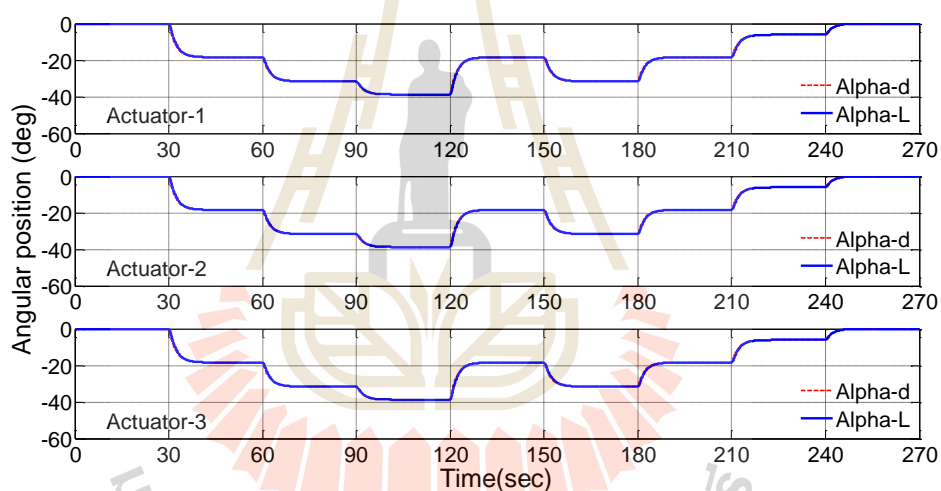
(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.30 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก

โดยกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

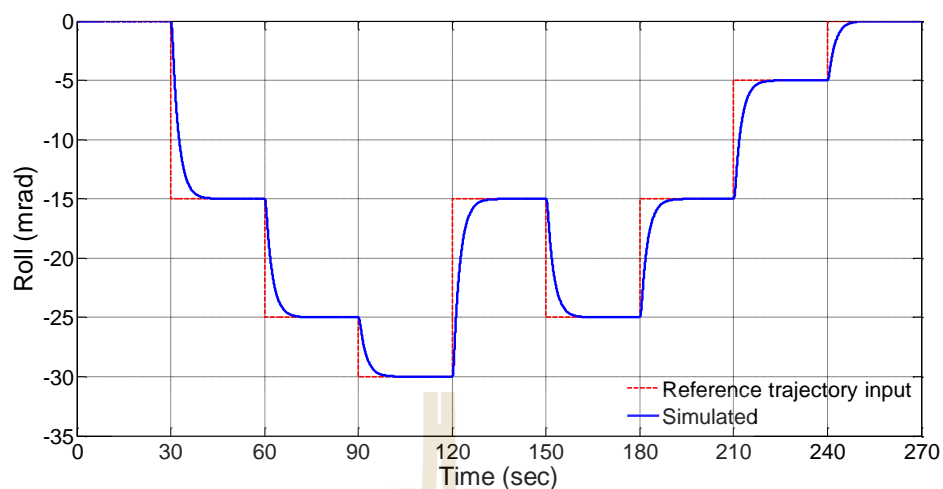


(ก) กราฟการหมุนรอบแนวแกน z มุมหมุนอยู่ในช่วง 0 ถึง +30 มิลลิเรเดียน

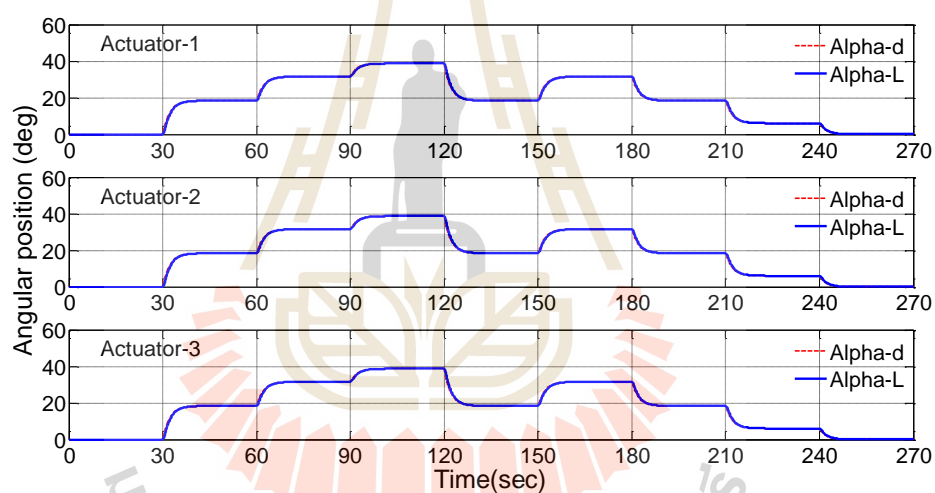


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.31 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3



(ก) กราฟการหมุนรอบแนวแกน z มุมหมุนอยู่ในช่วง 0 ถึง -30 มิลลิเรเดียน



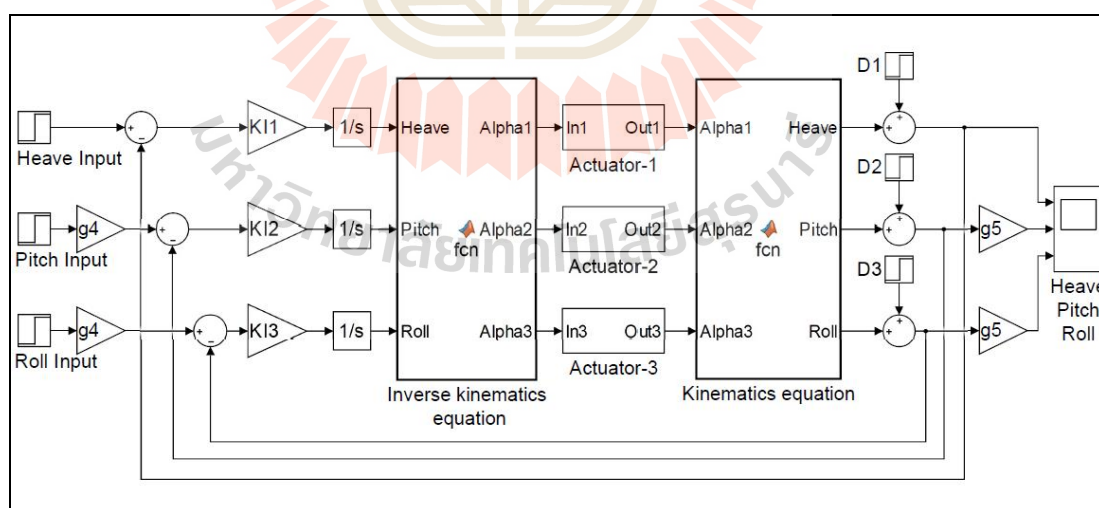
(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.32 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

4.3.4 การควบคุมการเคลื่อนไหวกแบบคงค่าเอาต์พุต

การควบคุมการเคลื่อนไหวกแบบคงค่าเอาต์พุต (output regulation) เป็นการกำหนดเป้าหมายของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ให้มีค่าคงที่ไว้ และกำหนดให้เป็นอินพุตอ้างอิงคือ v_d , θ_d และ ϕ_d เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกคือ D_v , D_θ และ D_ϕ เข้ามาในระบบแล้วทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น จากนั้นระบบควบคุมจะปรับตัวเองเพื่อให้ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบยังคงมีค่าคงที่เท่ากับอินพุตอ้างอิง แผนภาพบล็อกการควบคุมการเคลื่อนไหวกแบบคงค่าเอาต์พุตของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ จะอ้างอิงตามรูปที่ 4.22 และกำหนดให้อินพุตอ้างอิงคือ v_d , θ_d และ ϕ_d มีค่าคงที่ไว้

ในการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวกแบบคงค่าเอาต์พุต จะคล้ายกันกับการเคลื่อนไหวกแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง โดยแผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวกแบบคงค่าเอาต์พุตของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าการรบกวนจากภายนอกเป็นอินพุตที่เข้ามาในระบบคือ $D_v = D1$, $D_\theta = D2$ และ $D_\phi = D3$ จากนั้นดำเนินการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวกแบบคงค่าเอาต์พุต โดยกำหนดให้อินพุตเป็นการรบกวนจากภายนอกที่เข้ามาในระบบ ดังนี้ D_v มีค่าเท่ากับ ± 6 มิลลิเมตร D_θ มีค่าเท่ากับ ± 20 มิลลิเรเดียน และ D_ϕ มีค่าเท่ากับ ± 30 มิลลิเรเดียน และกำหนดให้อินพุตอ้างอิง v_d , θ_d และ ϕ_d มีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 4.33 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์การควบคุมการเคลื่อนไหวกแบบคงค่าเอาต์พุตของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

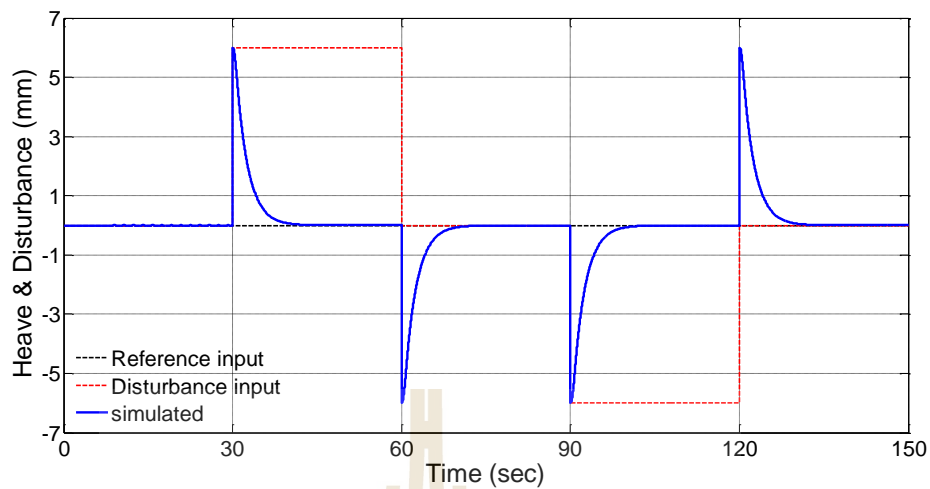
โดยผลการจำลองสถานการณ์มีดังนี้

กราฟรูปที่ 4.34 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดการรบกวนจากภายนอกที่เข้ามาในระบบ D_y มีค่าเท่ากับ ± 6 มิลลิเมตร และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3

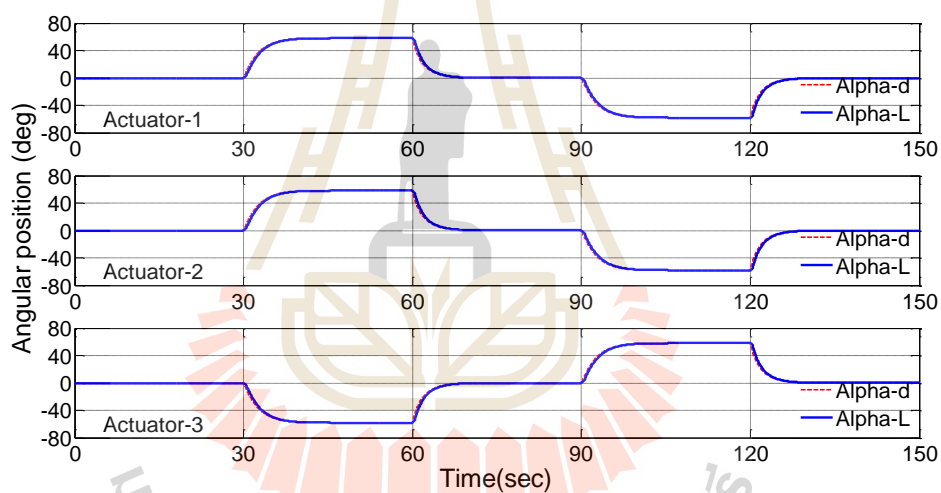
กราฟรูปที่ 4.35 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดการรบกวนจากภายนอกที่เข้ามาในระบบ D_θ มีค่าเท่ากับ ± 20 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3

กราฟรูปที่ 4.36 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก กำหนดการรบกวนจากภายนอกที่เข้ามาในระบบ D_ϕ มีค่าเท่ากับ ± 30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3

จากกราฟรูปที่ 4.34 ถึงกราฟรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดอินพุตอ้างอิง (reference input) มีค่าคงที่เท่ากับศูนย์ไว้แล้ว ให้มีการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบ (disturbance input) และทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ระบบควบคุมมีความสามารถปรับค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้า (angular position) ทั้งสามชุด เพื่อให้ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบ (simulated) มีค่าคงที่เท่ากับอินพุตอ้างอิงได้ โดยไม่เกิดค่าฟุ้งเกิน และค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์



(ก) กราฟการรบกวนจากภายนอกและการเคลื่อนที่ในแนวแกน y

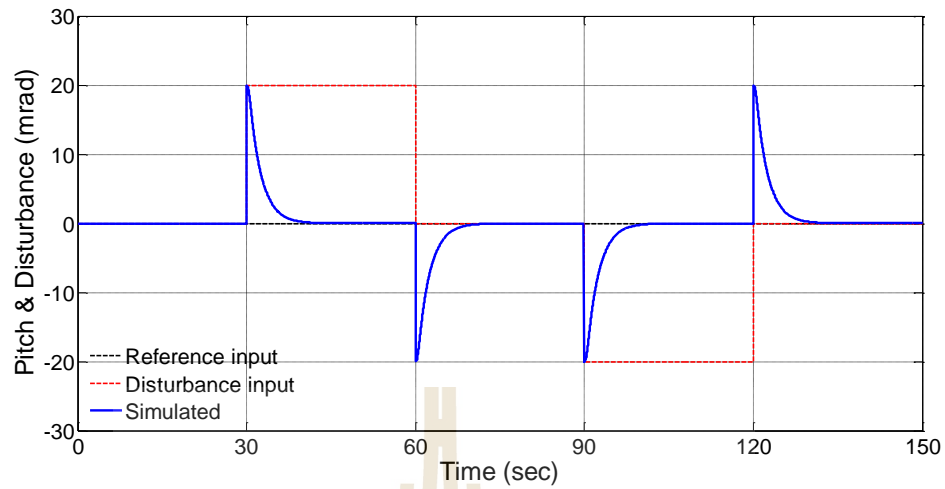


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

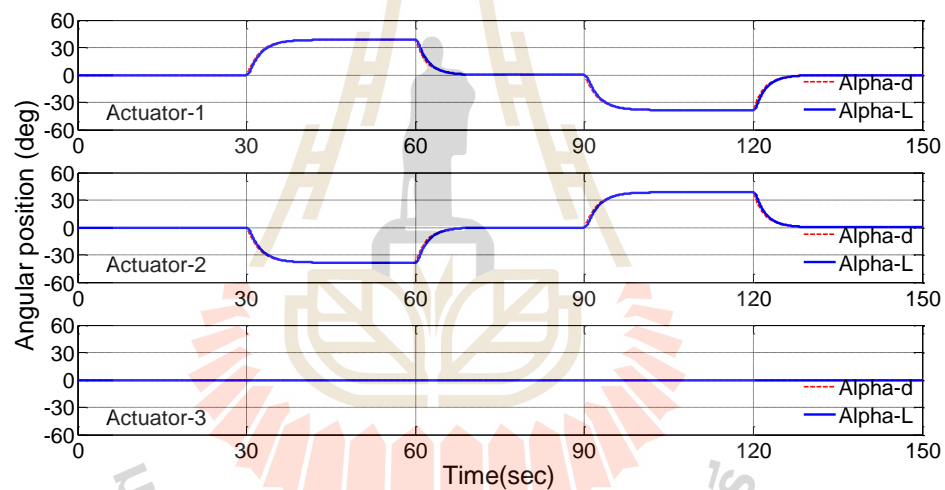
รูปที่ 4.34 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก

กำหนดการรบกวนจากภายนอก D_v มีค่าเท่ากับ ± 6 มิลลิเมตร

และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

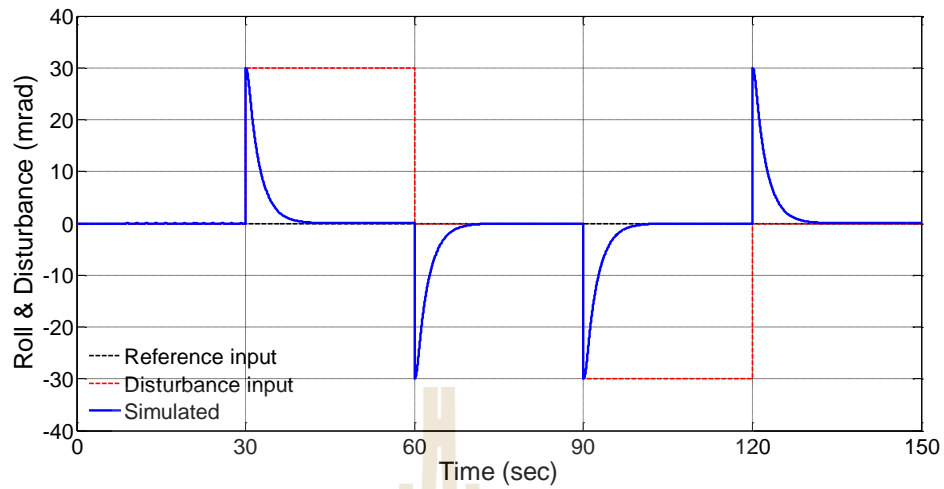


(ก) กราฟการรบกวนจากภายนอกและการหมุนรอบแนวแกน x

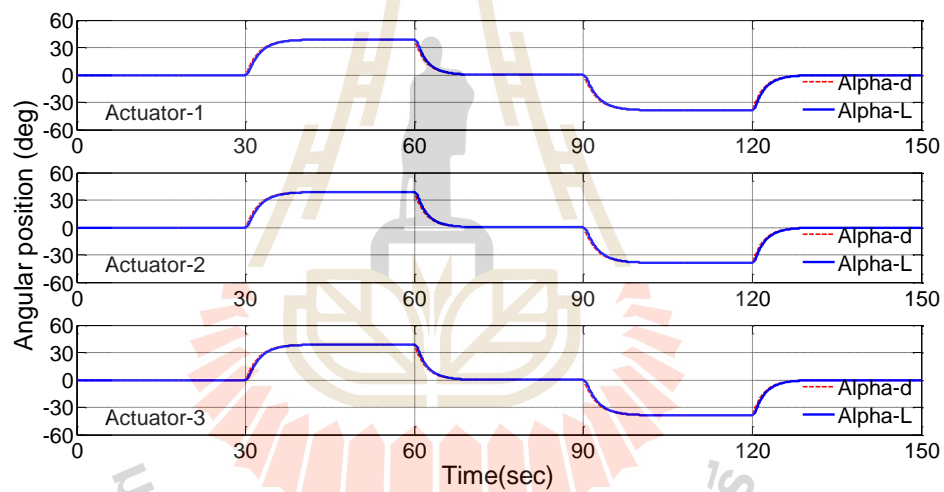


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.35 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน x ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก
กำหนดการรบกวนจากภายนอก D_θ มีค่าเท่ากับ ± 20 มิลลิเรเดียน
และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3



(ก) กราฟการรบกวนจากภายนอกและการหมุนรอบแนวแกน z

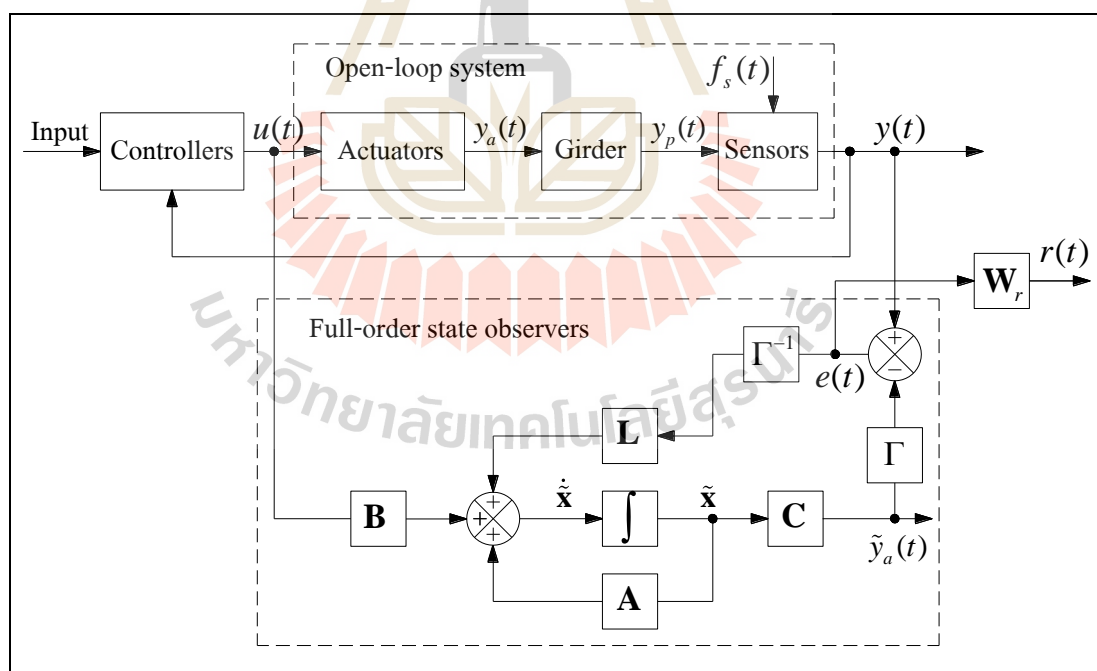


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 4.36 กราฟผลตอบสนองการหมุนรอบแนวแกน z ของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก กำหนดการรบกวนจากภายนอก D_ϕ มีค่าเท่ากับ ± 30 มิลลิเรเดียน และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

4.3.5 การตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้

การใช้ตัวตรวจรู้ทำการวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll) ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กนั้น โดยค่าที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปใช้ป้อนกลับให้กับระบบควบคุมอัตโนมัติ ถ้าหากตัวตรวจรู้เกิดความบกพร่องหรือผิดปกติขึ้น ค่าที่ตรวจวัดได้จะผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ขณะที่ระบบควบคุมยังทำงานตามค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น แต่ระบบพลวัตไม่ได้เกิดความบกพร่องหรือผิดปกติขึ้นเลย เพราะฉะนั้นการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ (sensor fault detection) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ เมื่อสามารถทำการตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้แล้ว ก็จะสามารถดำเนินการแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม การตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้จะอาศัยตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ (full-order state observer) เพื่อหาค่าที่เหลืออยู่ (residual generation) หรือค่าแตกต่างระหว่างเอาต์พุตระบบที่รวมค่าความผิดพลาดของตัวตรวจรู้แล้วกับเอาต์พุตระบบที่ได้จากตัวสังเกตสถานะ (Supat, 2009) แผนภาพบล็อกการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave, Pitch และ Roll สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แผนภาพบล็อกการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ของ Heave, Pitch และ Roll

จากรูปที่ 4.37 พิจารณาระบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ระบบวงเปิดจะมีสมการสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y_a(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (4-42)$$

กำหนดให้สมการจลนศาสตร์คือ Γ และสมการจลนศาสตร์ผกผันคือ Γ^{-1} เพราะฉะนั้นจะได้ $y_p(t) = \Gamma y_a(t)$ และกำหนดให้ $f_s(t)$ คือความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ ดังนั้น จะได้สมการเอาต์พุตของระบบ ดังนี้

$$y(t) = \Gamma \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + f_s(t) \quad (4-43)$$

และจะได้สมการของตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}\Gamma^{-1}e(t) \\ &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}\Gamma^{-1}(\Gamma y_a(t) + f_s(t) - \Gamma \tilde{y}_a(t)) \\ \tilde{y}_a(t) &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(t)\end{aligned}\quad (4-44)$$

เมื่อค่าผิดพลาดของตัวแปรสถานะ $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)$ และสมการที่ (4-42) ลบออกด้วยสมการที่ (4-44) จะได้

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)) - \mathbf{L}\Gamma^{-1}f_s(t) \\ \dot{\mathbf{e}}(t) &= (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\mathbf{e}(t) - \mathbf{L}\Gamma^{-1}f_s(t)\end{aligned}\quad (4-45)$$

และจะได้ค่าผิดพลาดของตัวแปรสถานะทางด้านเอาต์พุตของระบบ ดังนี้

$$\begin{aligned}e(t) &= y(t) - \Gamma \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(t) \\ &= \Gamma \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + f_s(t) - \Gamma \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(t) \\ &= \Gamma \mathbf{C}(\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)) + f_s(t)\end{aligned}\quad (4-46)$$

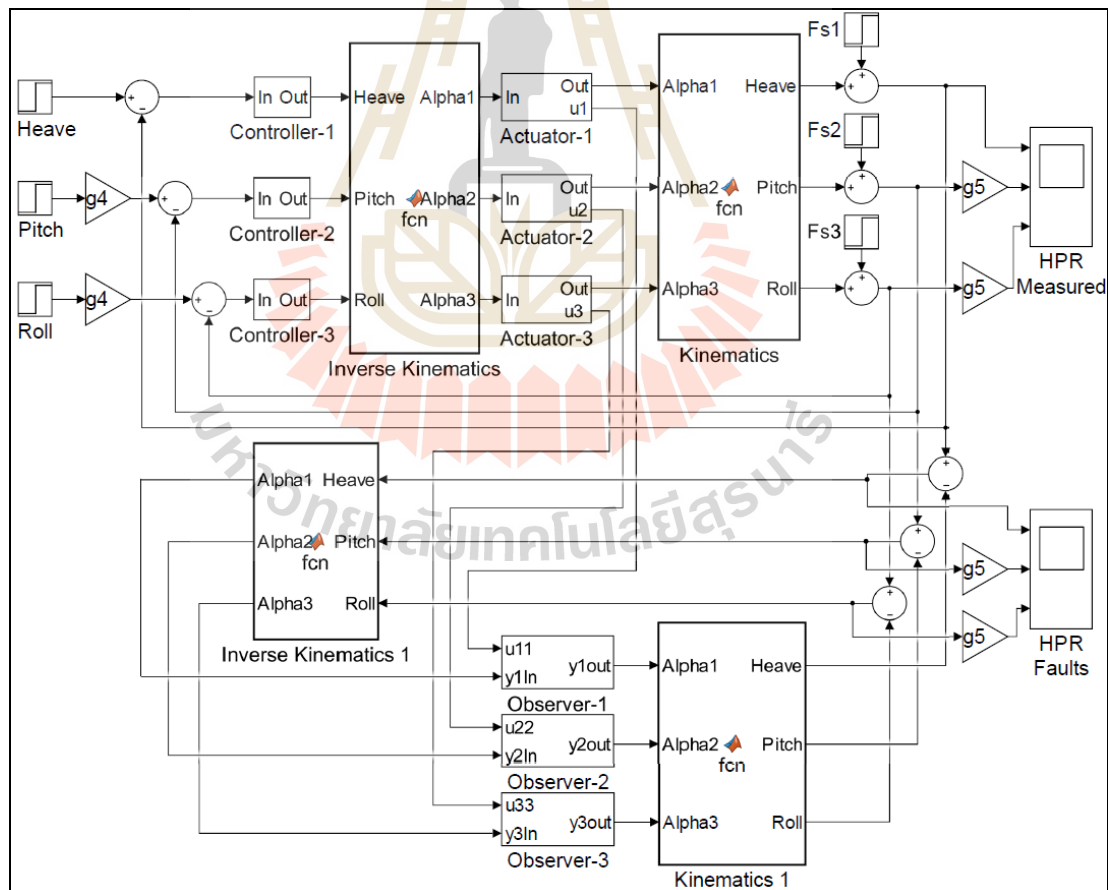
จากสมการที่ (4-46) ถ้าหากค่าผิดพลาดของตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)$ มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์แล้ว จะได้ค่าผิดพลาดของตัวแปรสถานะทางด้านเอาต์พุตของระบบ $e(t)$ มีค่า

เท่ากับความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ $f_s(t)$ เพราะฉะนั้นค่าที่เหลืออยู่ (residual generation) จะสามารถหาได้ดังสมการที่ (4-47)

$$r(t) = W_r e(t) \quad (4-47)$$

โดยเมทริกซ์ W_r ใช้สำหรับออกแบบเพื่อให้เห็นคุณลักษณะของสัญญาณค่าที่เหลืออยู่

การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ ของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z โดยจะใช้แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave, Pitch และ Roll ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.38 ซึ่ง Fs1, Fs2 และ Fs3 คือค่าความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave, Pitch และ Roll



รูปที่ 4.38 แผนภาพบล็อกการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave, Pitch และ Roll ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

โดยผลการจำลองสถานการณ์มีดังนี้

กราฟรูปที่ 4.39 กราฟผลตอบแทนของการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดอินพุตอ้างอิง Heave ไว้ที่ +4 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที กำหนดให้เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave ขึ้น ขนาด +1 มิลลิเมตร

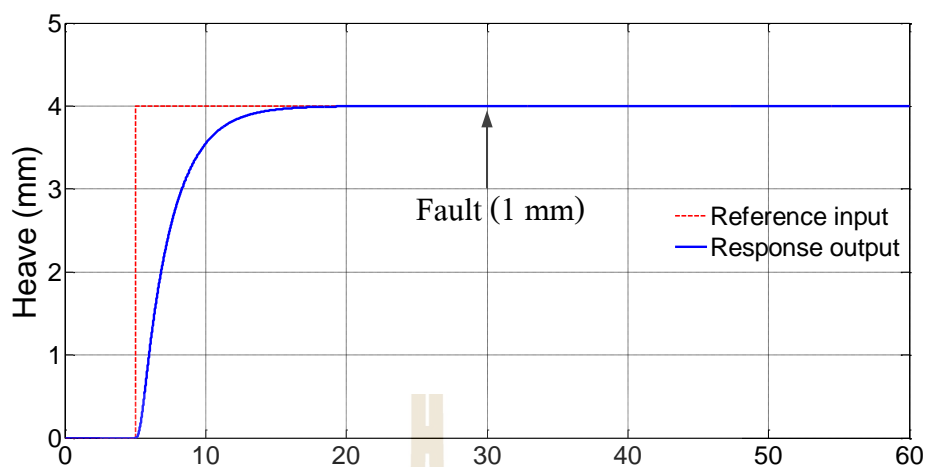
กราฟรูปที่ 4.40 กราฟผลตอบแทนของการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดอินพุตอ้างอิง Pitch ไว้ที่ +15 มิลลิเรเดียน เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที กำหนดให้เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Pitch ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน

กราฟรูปที่ 4.41 กราฟผลตอบแทนของการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดอินพุตอ้างอิง Roll ไว้ที่ +20 มิลลิเรเดียน เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที กำหนดให้เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Roll ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน

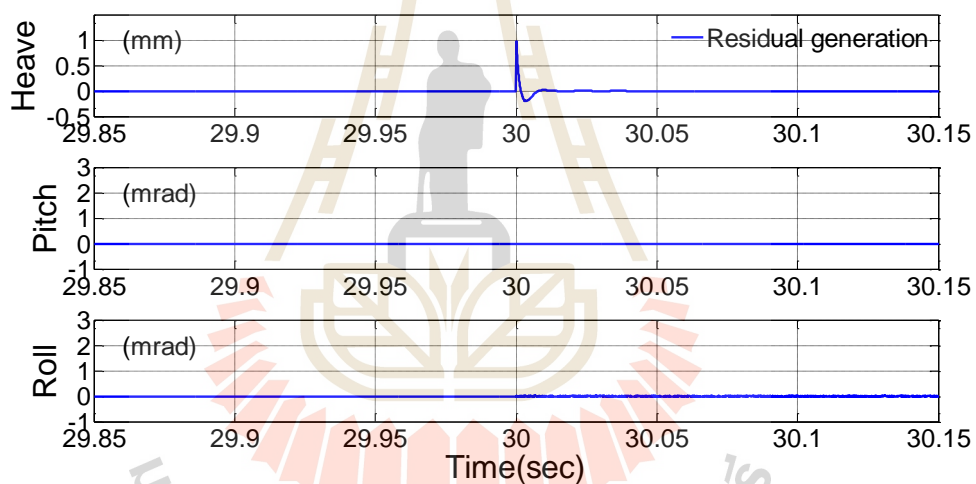
กราฟรูปที่ 4.42 กราฟผลตอบแทนของการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยกำหนดอินพุตอ้างอิง Heave ไว้ที่ +4 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที กำหนดให้เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave ขึ้น ขนาด +1 มิลลิเมตร เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Pitch และ Roll ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน

จากกราฟรูปที่ 4.39 จนถึงกราฟรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดอินพุตอ้างอิง (reference input) ไว้เวลาผ่านไป 30 วินาที เมื่อตัวตรวจรู้เกิดความผิดพลาดขึ้น ระบบจะสามารถตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ได้ จากค่าที่เหลืออยู่ (residual generation) เมื่อสามารถตรวจวัดค่าความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ได้แล้ว ในการใช้งานจริงอาจมีการติดตั้งตัวตรวจรู้อีกตัวคู่ขนานกันไว้ หรือออกแบบให้ตัวควบคุมสามารถปรับค่าตามความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ได้

จากกราฟรูปที่ 4.42 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดอินพุตอ้างอิงไว้แล้ว เวลาผ่านไป 30 วินาที เมื่อตัวตรวจรู้เกิดความผิดพลาดขึ้นพร้อมกันทั้งสามตัว ระบบจะสามารถตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ทั้งสามตัวพร้อมกันได้ จากค่าที่เหลืออยู่

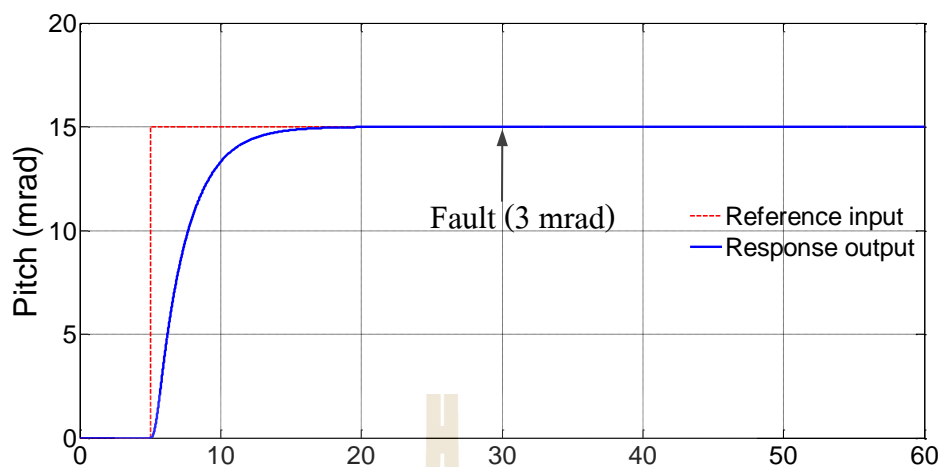


(ก) กราฟการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ระยะเคลื่อนที่ +4 มิลลิเมตร

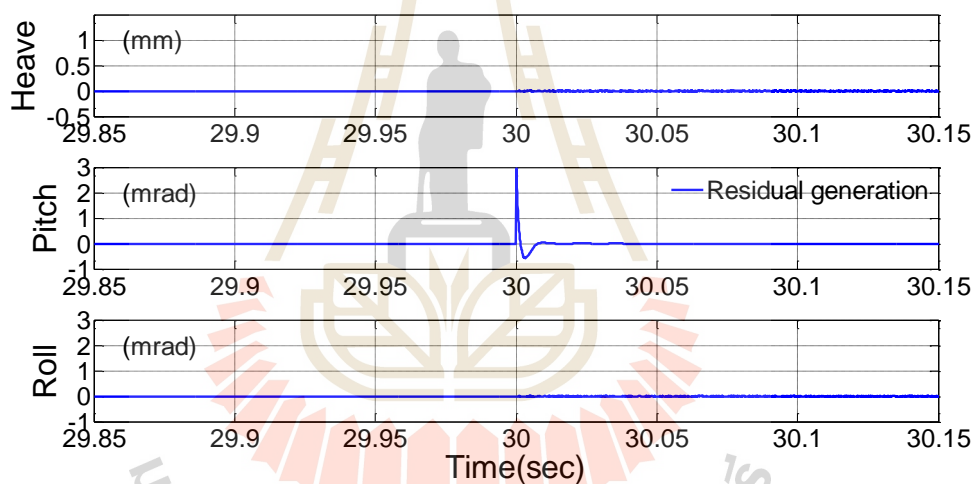


(ข) กราฟการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้

รูปที่ 4.39 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll กำหนดอินพุตอ้างอิง Heave ไว้ที่ +4 มิลลิเมตร และที่เวลา 30 วินาที เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave ขึ้น ขนาด +1 มิลลิเมตร

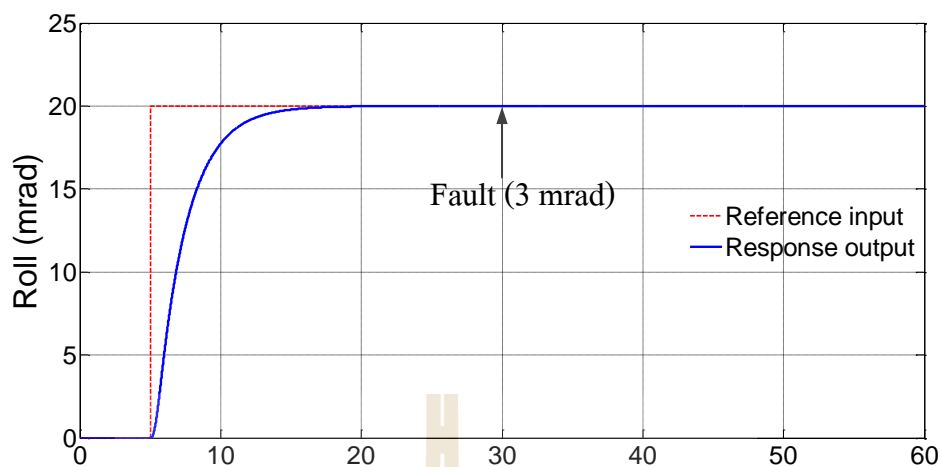


(ก) กราฟการหมุนรอบแนวแกน x มุมหมุน +15 มิลลิเรเดียน

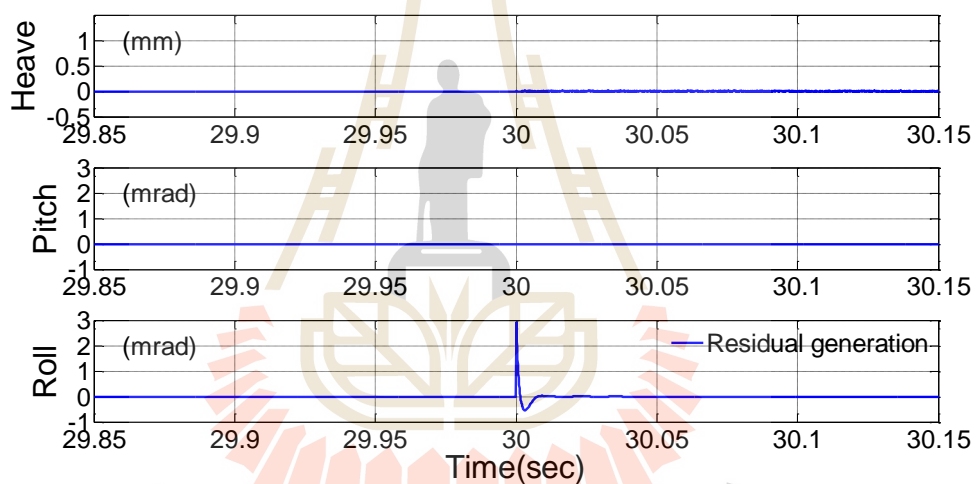


(ข) กราฟการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้

รูปที่ 4.40 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll
กำหนดอินพุตอ้างอิง Pitch ไว้ที่ +15 มิลลิเรเดียน และที่เวลา 30 วินาที
เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Pitch ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน

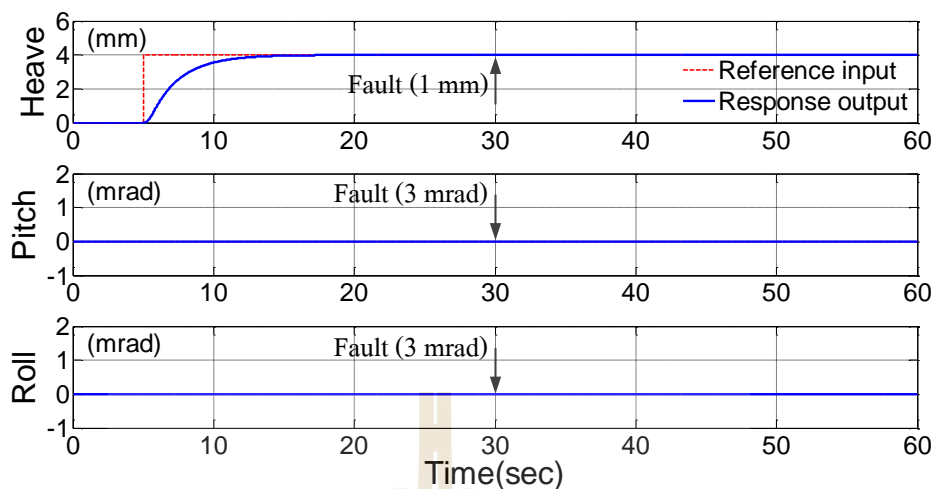


(ก) กราฟการหมุนรอบแนวแกน z มุมหมุน +20 มิลลิเรเดียน

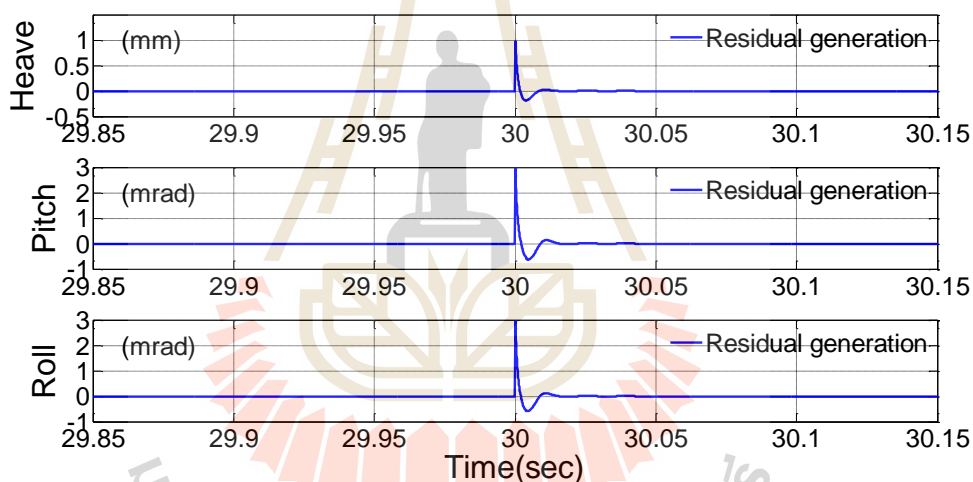


(ข) กราฟการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้

รูปที่ 4.41 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll กำหนดอินพุตอ้างอิง Roll ไว้ที่ +20 มิลลิเรเดียน และที่เวลา 30 วินาที เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Roll ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน



(ก) กราฟการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ระยะเคลื่อนที่ +4 มิลลิเมตร



(ข) กราฟการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้

รูปที่ 4.42 กราฟผลตอบสนองการเคลื่อนที่และการหมุน Heave, Pitch และ Roll กำหนดอินพุตอ้างอิง Heave ไว้ที่ +4 มิลลิเมตร และที่เวลา 30 วินาที เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Heave ขึ้น ขนาด +1 มิลลิเมตร เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Pitch ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน และ เกิดความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ Roll ขึ้น ขนาด +3 มิลลิเรเดียน

4.4 สรุป

การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหว่อัตโนมัตินี้ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ให้มีความสามารถเคลื่อนไหว่ได้ 3 องศาอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ และสามารถเคลื่อนไหว่อัตโนมัตินี้ได้ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต การออกแบบเริ่มต้นด้วยการวัดค่าและการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบขับเคลื่อน การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขับเคลื่อน ออกแบบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน (ลูบควบคุมด้านใน) ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดให้กับอัตราขยายพีไอ และตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ใช้วิธีการวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบ ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของเรทท์และทฤษฎีบทเลียปูนอฟ จำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อน โดยผลการจำลองสถานการณ์ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์

จากนั้นออกแบบการควบคุมการเคลื่อนไหว่อัตโนมัตินี้ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดให้กับอัตราขยายอินทิกรัล โดยระบบขับเคลื่อนใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กในโดเมน z แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง จำลองสถานการณ์การเคลื่อนไหว่อัตโนมัตินี้ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง ระบบควบคุมมีความสามารถปรับให้ค่าเอาต์พุตของระบบสามารถตามรอยแนววิถีอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้ และการเคลื่อนไหว่อัตโนมัตินี้แบบคงค่าเอาต์พุต เมื่อเกิดการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบแล้ว ระบบควบคุมสามารถปรับให้ค่าเอาต์พุตของระบบคงที่ตามอินพุตอ้างอิงได้ โดยผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณี ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ และจำลองสถานการณ์การตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ค่าเอาต์พุตของระบบ โดยระบบสามารถตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ได้

บทที่ 5

การทดสอบการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

5.1 บทนำ

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นจะได้รับการทดสอบ มีขั้นตอนดังนี้ ติดตั้งบอร์ดควบคุมที่ต่อประสานอุปกรณ์ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุม การหมุนของระบบขับเคลื่อน ตัวตรวจรู้ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ตัวตรวจรู้มุมการหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z แล้วต่อประสานบอร์ดควบคุมเข้ากับคอมพิวเตอร์ จากนั้นเขียนโปรแกรมการควบคุมระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยวกลแบบเอียงศูนย์กลาง และการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ทำการทดสอบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนทั้งตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ จากนั้นทำการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต โดยผลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

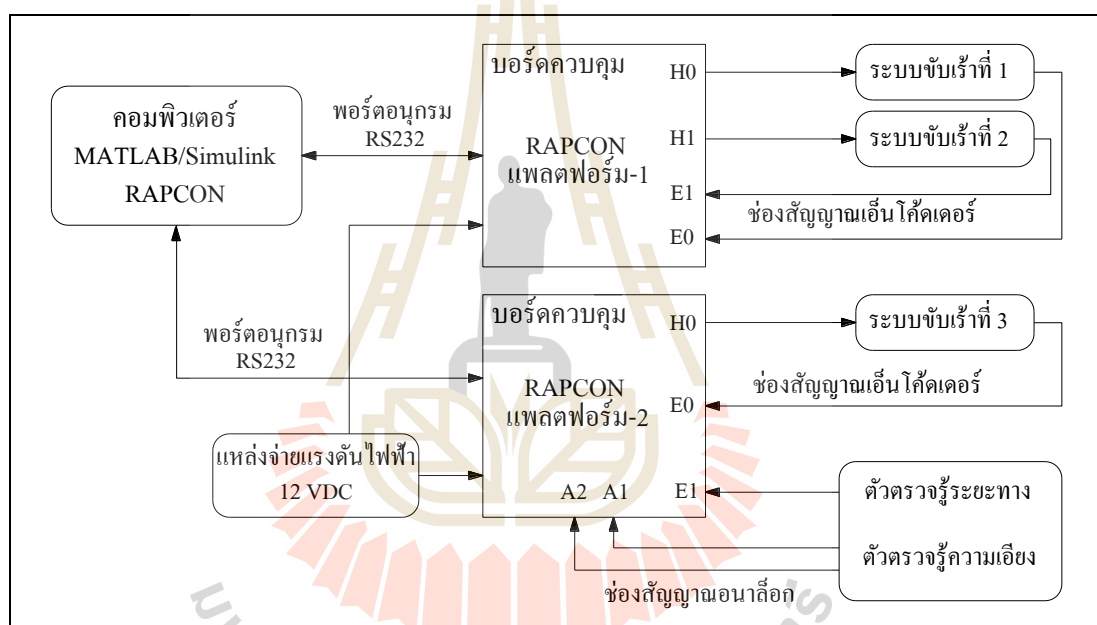
5.2 การติดตั้งอุปกรณ์ระบบควบคุม

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กประกอบติดตั้งแล้วเสร็จ ใช้ระบบขับเคลื่อน จำนวน 3 ชุด ที่มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อนและใช้ตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุน การเคลื่อนไหวของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กใช้ตัวตรวจรู้มุมการหมุนแบบสองแกน และตัวตรวจรู้ระยะการเคลื่อนที่โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะต่อประสานเข้ากับบอร์ดควบคุม

5.2.1 การต่อประสานอุปกรณ์ระบบควบคุม

การตรวจวัดมุมหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก ใช้ตัวตรวจรู้ความเอียงแบบสองแกน DIS sensors QG76-SD010H-AV-CM มีค่าความแม่นยำการวัด 0.6 มิลลิเรเดียน และการตรวจวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ใช้ตัวตรวจรู้ระยะทาง CITIZEN IPD-P510 มีค่าความแม่นยำการวัด 5 ไมโครเมตร การตรวจวัดตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนใช้ตัวตรวจรู้เอ็นโค้ดเดอร์แกนหมุนแบบเพิ่มค่า LS S40-6-2500 ค่าความละเอียดการวัด 2,500 สเต็ปต่อรอบ โดยตัวตรวจวัดทั้งหมดต่อประสานเข้ากับบอร์ดควบคุมที่ใช้แพลตฟอร์ม RAPCON (real-time rapid control prototyping platform for MATLAB/Simulink) (Wiboonjaroen, 2013, Supachai, 2016 และ www.zeltom.com)

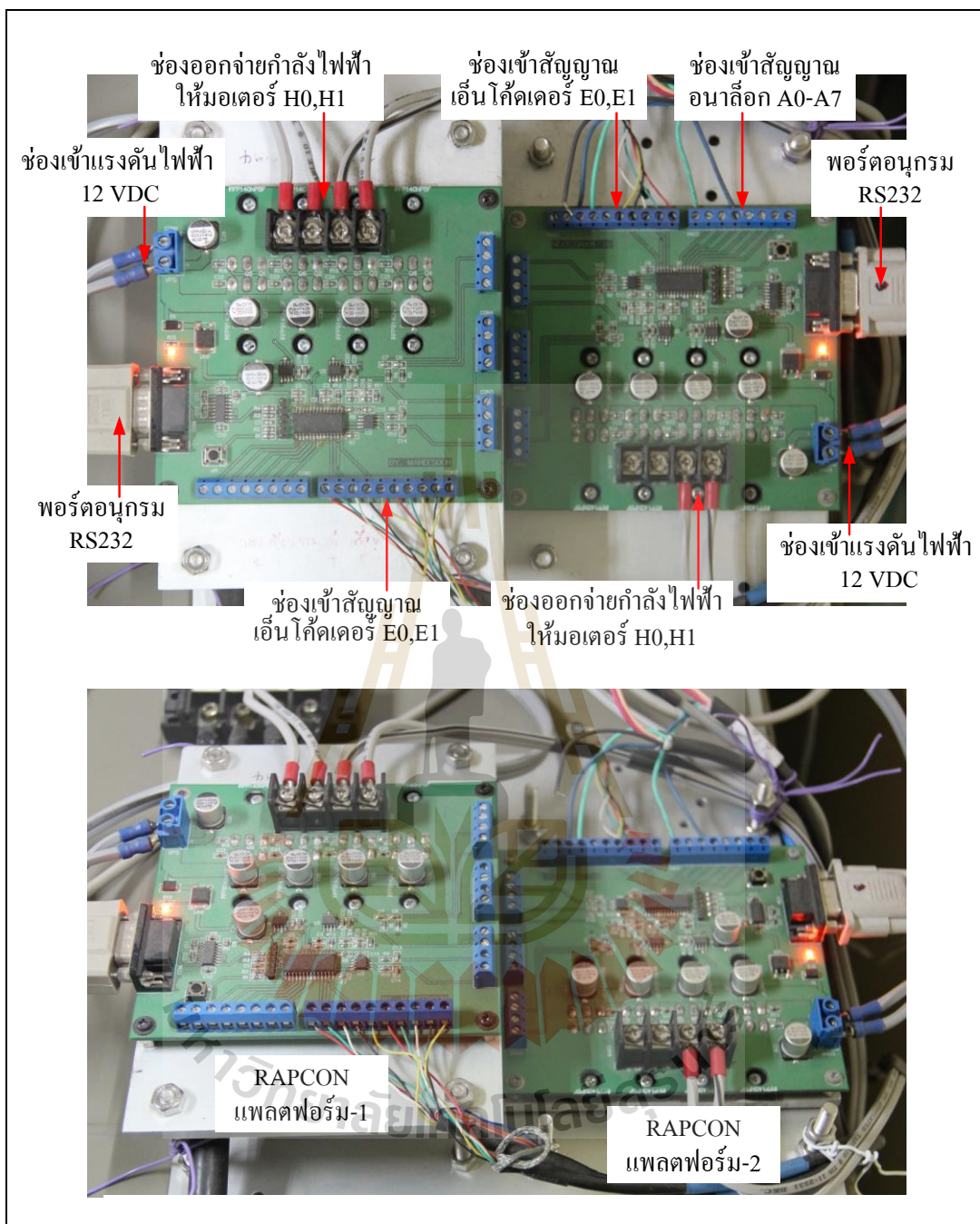
แผนภาพบล็อกการต่อประสานอุปกรณ์ระบบควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า ใช้แพลตฟอร์ม RAPCON จำนวน 2 ชุด ช่องเอาต์พุต H0 และ H1 ใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ PWM (pulse width modulation) ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ช่องอินพุต E0 และ E1 ใช้รับสัญญาณจากตัวตรวจรู้เอ็นโค้ดเดอร์ ช่องอินพุต A1 และ A2 ใช้รับสัญญาณจากตัวตรวจรู้มุมเอียงแบบสองแกน ช่องอินพุต E1 ใช้รับสัญญาณจากตัวตรวจรู้ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y โดยบอร์ดควบคุมจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ บอร์ดทั้งสองต่อประสานกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS232 และติดตั้งโปรแกรม MATLAB R2009a Windows 7 (32 bit) ร่วมกับโปรแกรม RAPCON บอร์ดควบคุมที่ใช้แพลตฟอร์ม RAPCON แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



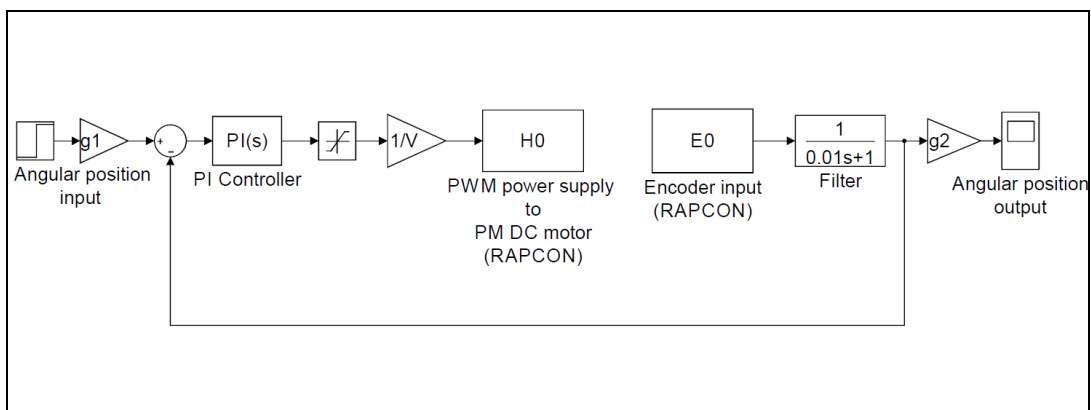
รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกการต่อประสานอุปกรณ์ระบบควบคุม

5.2.2 การเขียนโปรแกรมควบคุมด้วย MATLAB/Simulink

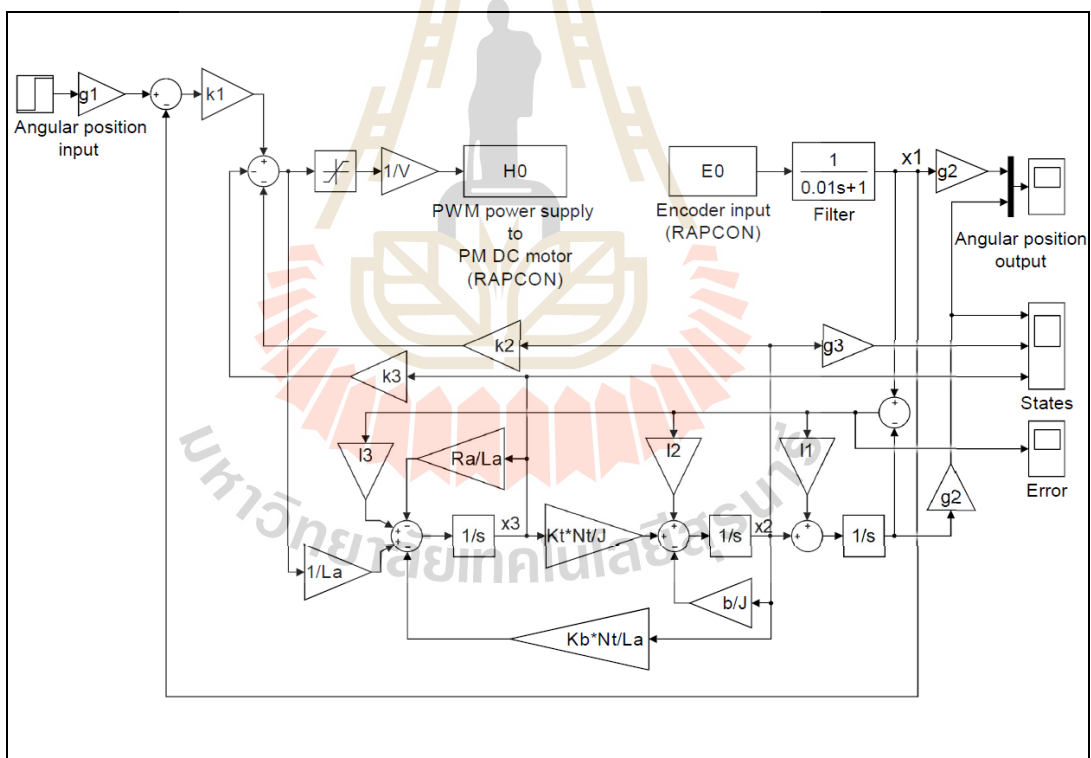
การเขียนโปรแกรมควบคุมด้วย MATLAB/Simulink เริ่มต้นด้วยการเขียนโปรแกรมควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 โปรแกรมควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง และแบบคงค่าเอาต์พุต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



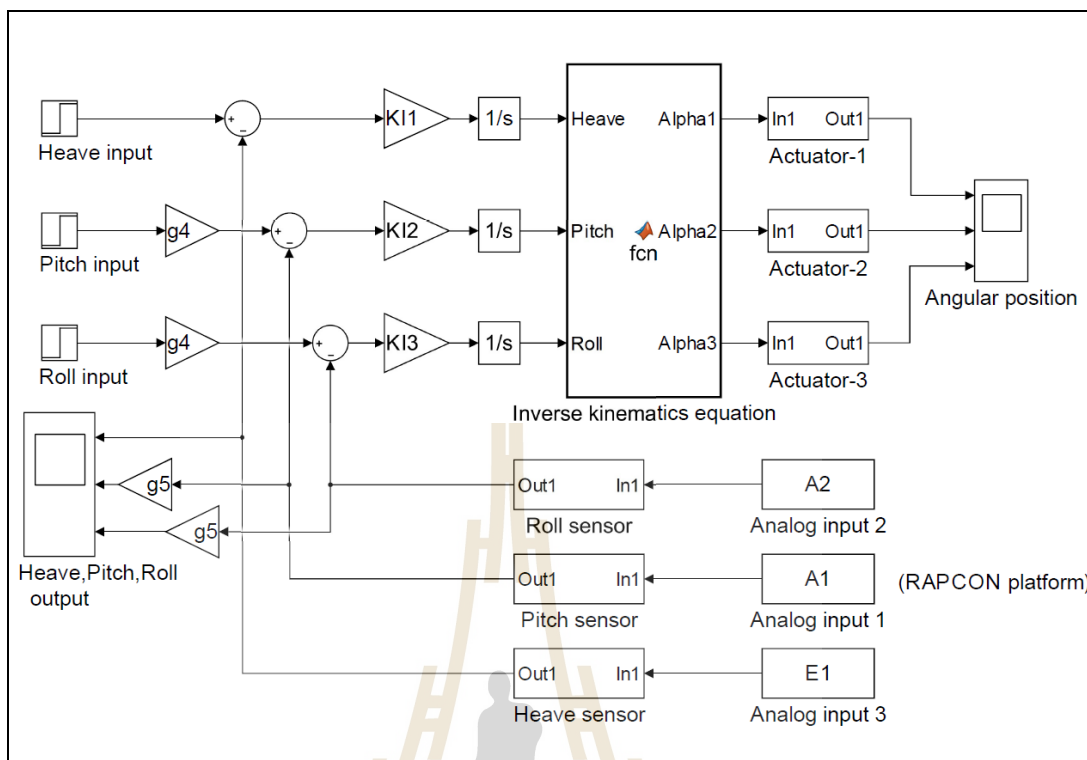
รูปที่ 5.2 บอร์ดควบคุมแพลตฟอร์ม RAPCON



รูปที่ 5.3 โปรแกรมควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 5.4 โปรแกรมควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 5.5 โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนไหวดัดโนมติกของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก
3 องศาอิสระ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต
โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink

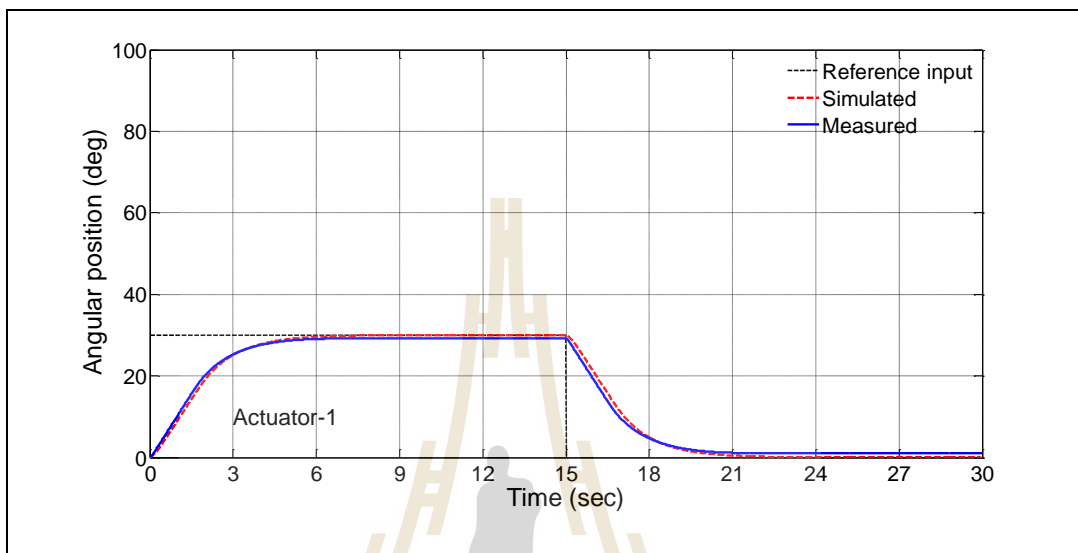
5.3 การทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง

ระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง จำนวน 3 ชุด ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรเป็นตัวขับเคลื่อน ผ่านเฟืองตัวหนอนและเฟืองเพลาเน็ตตารี ส่งกำลังให้กับลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง ใช้ตัวตรวจรู้เอ็นโค้ดเดอร์แกนหมุนแบบเพิ่มค่าวัดตำแหน่งเชิงมุมการหมุน โดยอุปกรณ์ที่นำมาจัดสร้างระบบขับเคลื่อนทั้งสามชุดกำหนดให้มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกชิ้น การทดสอบเริ่มจากการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ตามด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ และทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้วยเทคนิคทางวิศวกรรมที่เหมาะสม

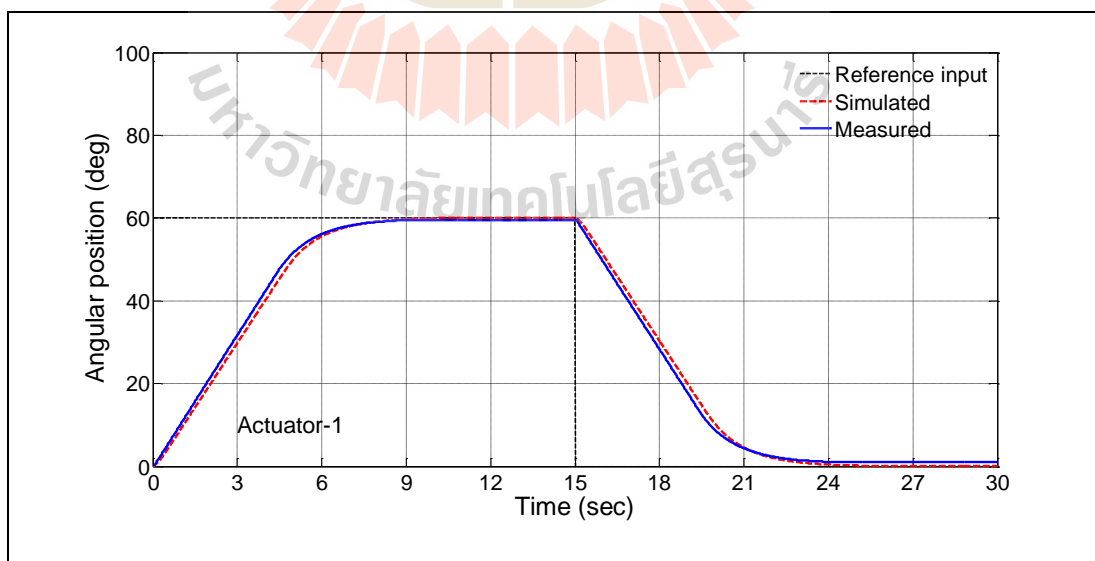
5.3.1 การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

การทดสอบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โปรแกรมการควบคุมดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 และใช้ค่าอัตราขยายพีไอ $K_p = 39.1985$ และ $K_i = 0.1028$ โดยกำหนดอินพุตอ้างอิง (reference input) ไว้ที่ ± 30 องศา ± 60 องศา และ

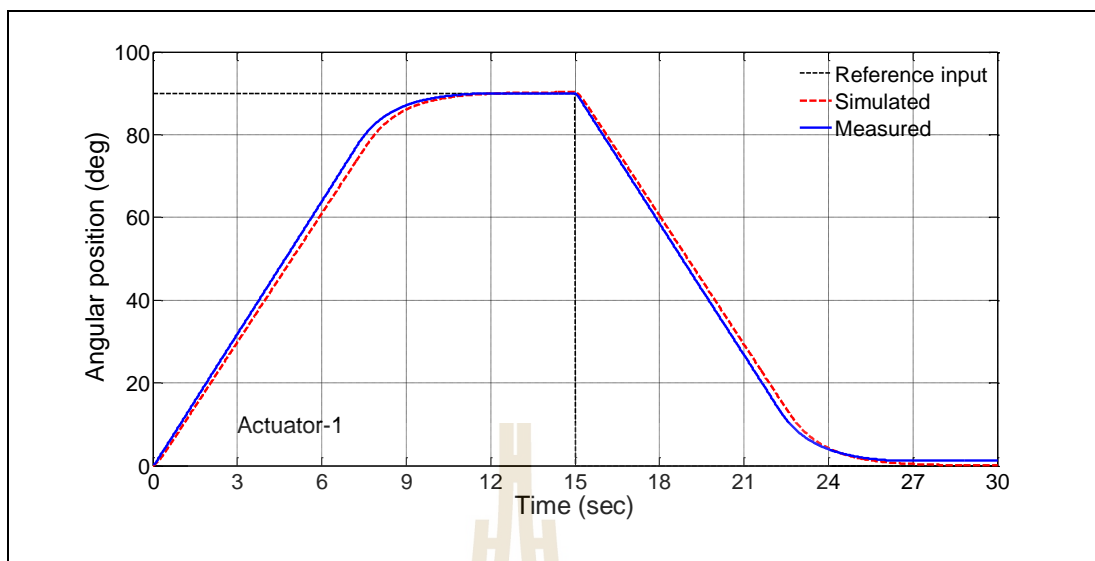
± 90 องศา ตามลำดับ โดยผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุน (measured) และผลการจำลองสถานการณ์ (simulated) ของระบบขับเคลื่อนที่ 1 แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.6 กราฟรูปที่ 5.7 และกราฟรูปที่ 5.8 ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

จากกราฟรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวที่ค่ามุม $+30$ องศา น้อยกว่าอินพุตอ้างอิง 0.7 องศา และที่ค่ามุม -30 องศา มากกว่าอินพุตอ้างอิง 1.1 องศา กราฟรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวที่ค่ามุม $+60$ องศา น้อยกว่าอินพุตอ้างอิง 0.5 องศา และที่ค่ามุม -60 องศา มากกว่าอินพุตอ้างอิง 1.1 องศา และกราฟรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวที่ค่ามุม $+90$ องศา มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ และที่ค่ามุม -90 องศา มากกว่าอินพุตอ้างอิง 1.1 องศา โดยเวลาเข้าที่ใกล้เคียงกันกับการจำลองสถานการณ์ และไม่เกิดค่าพุ่งเกิน

การทดสอบการตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 2 และ 3 โดยกำหนดอินพุตอ้างอิงไว้ที่ ± 30 องศา ± 60 องศา และ ± 90 องศา ตามลำดับ โดยสามารถสรุปผลการตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 ได้ดังในตารางที่ 5.1

จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวที่ค่ามุม $+90$ องศา มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ เพราะว่าที่ค่ามุม $+90$ องศา ได้ถูกนำไปหาค่าเหมาะที่สุดของอัตราขยายพีไอ ส่วนที่ค่ามุมการหมุนอื่น ๆ จะเกิดค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวขึ้น การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และใช้อัตราขยายพีไอคงที่ไว้ค่าหนึ่งจะให้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเกิดขึ้น ดังนั้น ตัวควบคุมนี้มีความไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งระบบขับเคลื่อนจะต้องสามารถหมุนในช่วง ± 90 องศา และต้องมีทั้งความละเอียดและแม่นยำสูงด้วย

ตารางที่ 5.1 ผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1, 2 และ 3
โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

ตำแหน่ง เชิงมุม การหมุน (องศา)	ระบบขับเร้าที่ 1		ระบบขับเร้าที่ 2		ระบบขับเร้าที่ 3	
	ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (องศา)		ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (องศา)		ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (องศา)	
	มุมบวก	มุมลบ	มุมบวก	มุมลบ	มุมบวก	มุมลบ
± 30	-0.7	+1.1	-0.8	+1.3	-1.0	+0.8
± 60	-0.5	+1.1	-0.4	+1.3	-0.5	+0.8
± 90	0.0	+1.1	0.0	+1.3	0.0	+0.8

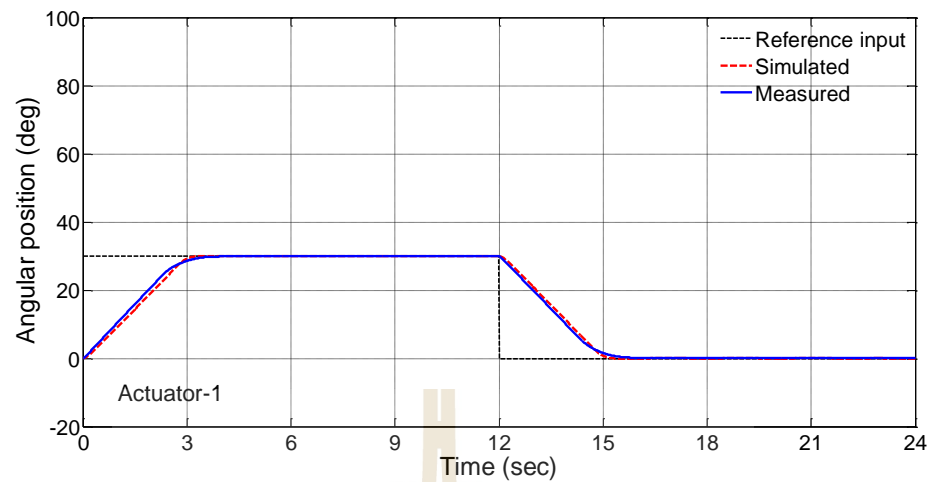
5.3.2 การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

ร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

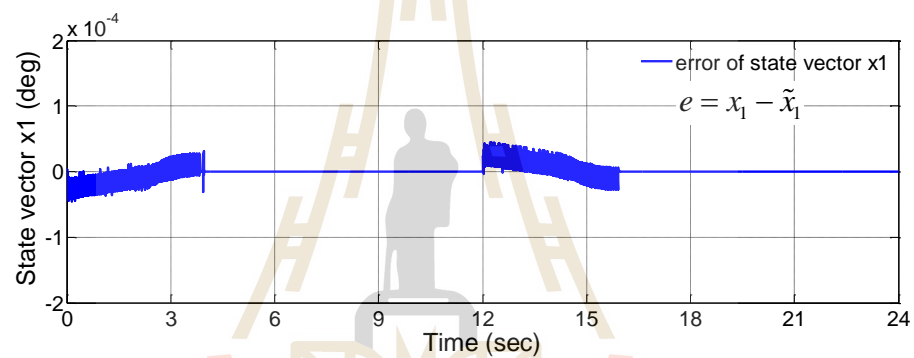
การทดสอบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ใช้โปรแกรมการควบคุมดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.4 กำหนดให้ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบขับเร้าดังที่แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.3 จะได้อัตราขยายการป้อนกลับสถานะ $k_1 = 211.5988$, $k_2 = 11.8681$ และ $k_3 = 0.8415$ กำหนดให้ตำแหน่งโพลวงปิดของตัวสังเกตดังที่แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.4 จะได้อัตราขยายตัวสังเกตสถานะ $l_1 = 1,402.7368$, $l_2 = 246,402.5301$ และ $l_3 = 1,215,062,440.4841$

การทดสอบการตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 1 และกำหนดอินพุตอ้างอิงไว้ที่ ± 30 องศา ± 60 องศา และ ± 90 องศา ตามลำดับ โดยผลทดสอบแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.9 กราฟรูปที่ 5.10 และกราฟรูปที่ 5.11 ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบการตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเร้าที่ 2 และ 3 กำหนดอินพุตอ้างอิงไว้ที่ ± 90 องศา โดยผลทดสอบแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.12 และกราฟรูปที่ 5.13

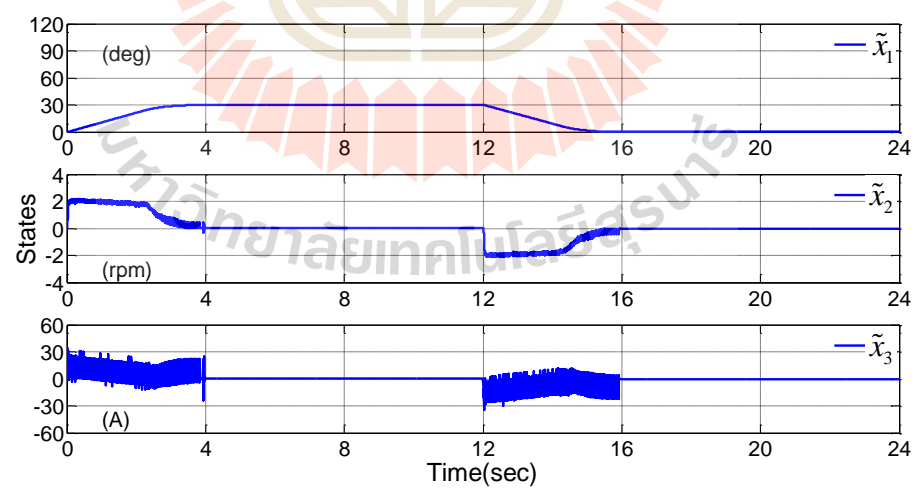
จะเห็นได้ว่าจากกราฟรูปที่ 5.9 ถึงกราฟรูปที่ 5.13 ผลการตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนมีค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 0.2 องศา ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน และเวลาเข้าที่ใกล้เคียงกับการจำลองสถานการณ์ โดยค่าผิดพลาดระหว่างค่าตัวแปรสถานะจริง x_1 กับค่าการประมาณของตัวแปรสถานะ \hat{x}_1 มีค่าน้อยมากอยู่ในช่วง $\pm 1 \times 10^{-4}$ องศา ค่าการประมาณของตัวแปรสถานะ \hat{x}_2 และ \hat{x}_3 มีค่าเข้าสู่ศูนย์เมื่อระบบอยู่ในสภาวะอยู่ตัวแล้ว



(ก) กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1



(ข) กราฟค่าผิดพลาดระหว่างการวัดกับการประมาณค่าของตัวแปรสถานะ x_1

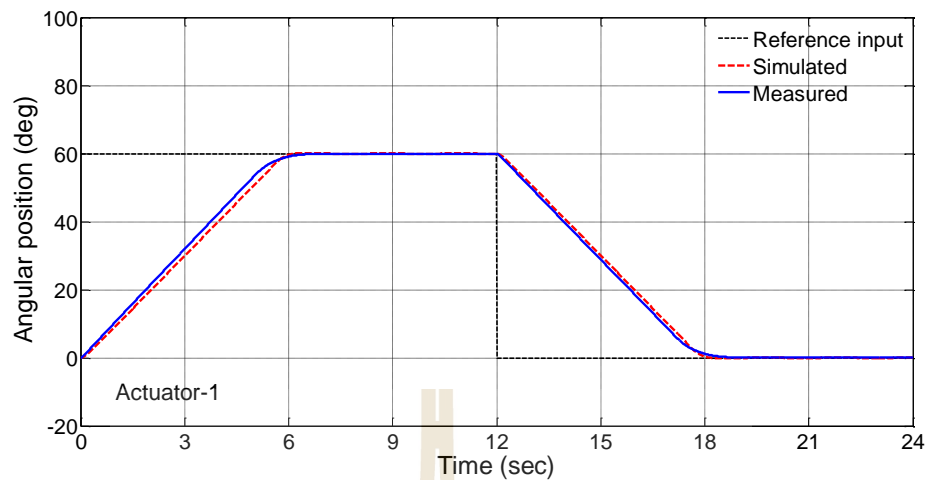


(ค) กราฟผลตอบสนองของการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

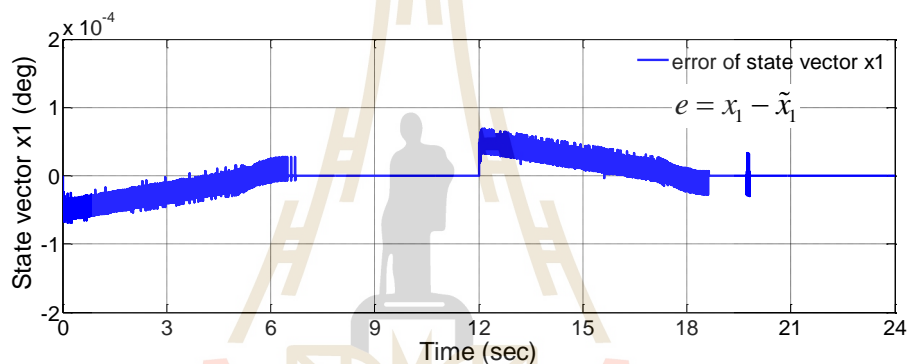
รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1

และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 30 องศา ใช้ตัวควบคุม

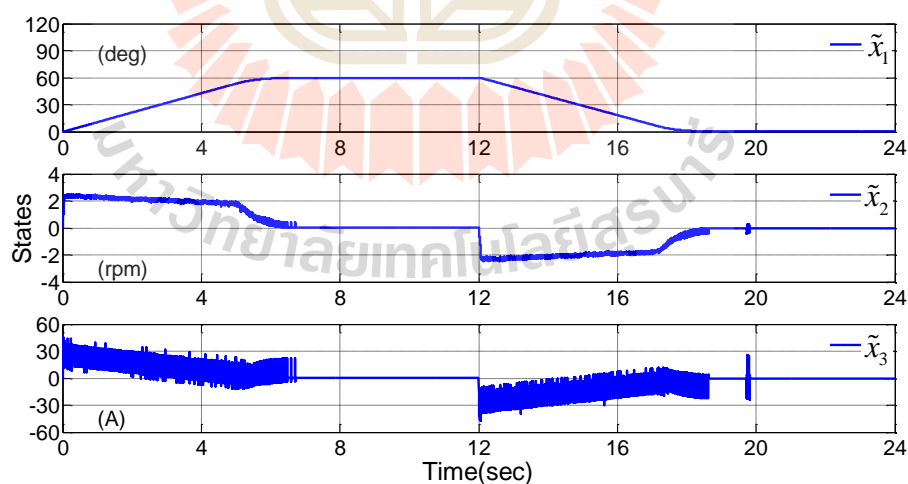
แบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ



(ก) กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1

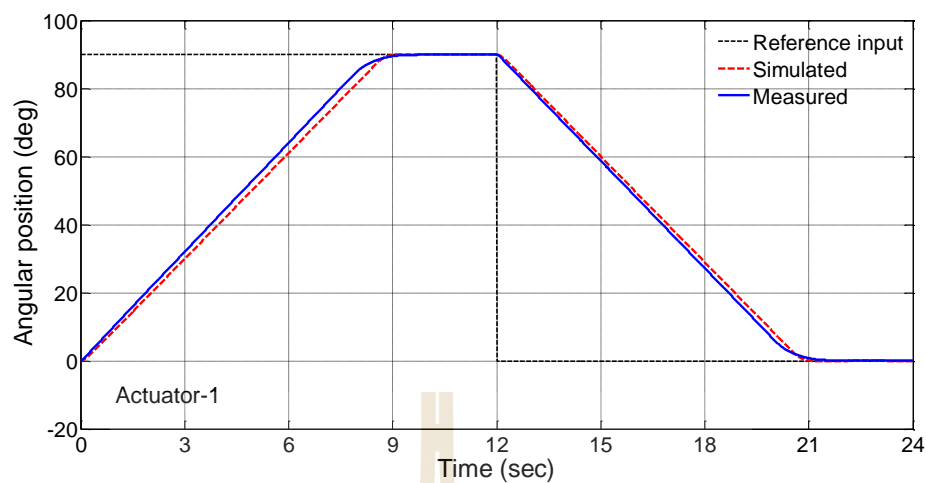


(ข) กราฟค่าผิดพลาดระหว่างการวัดกับการประมาณค่าของตัวแปรสถานะ x1

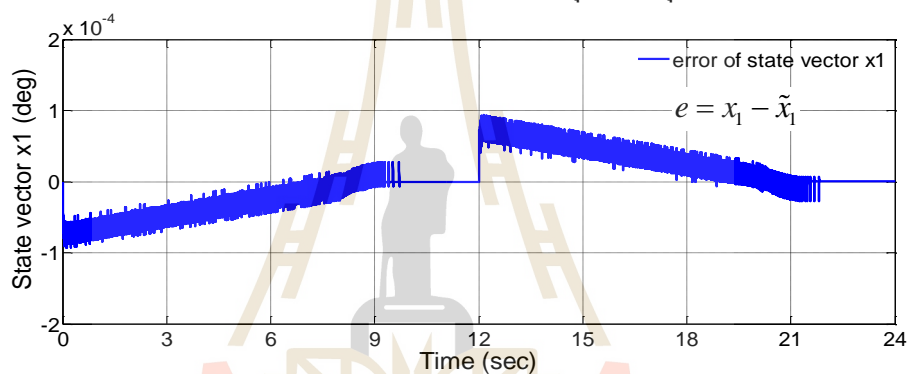


(ค) กราฟผลตอบสนองของการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

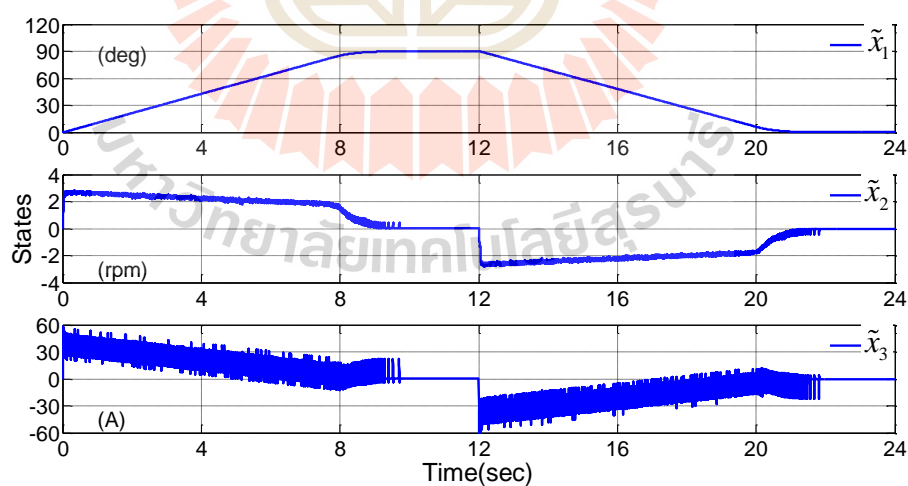
รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 60 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ



(ก) กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1

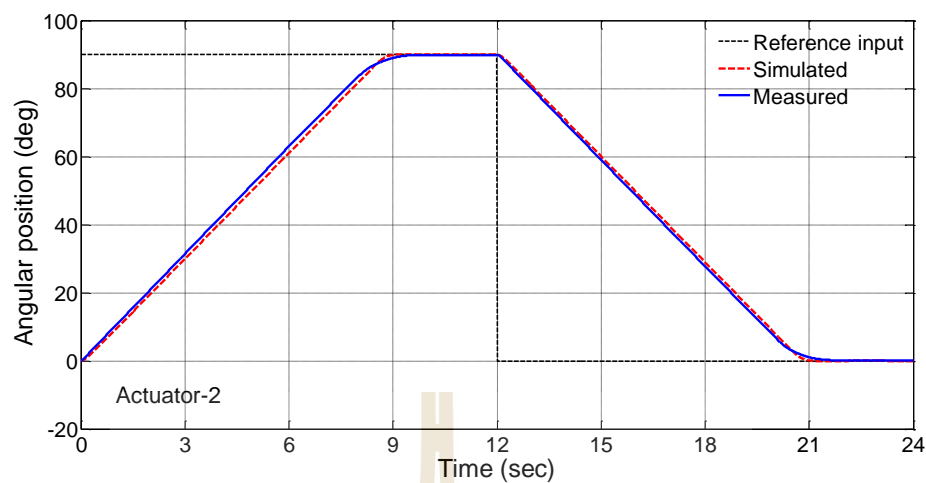


(ข) กราฟค่าผิดพลาดระหว่างการวัดกับการประมาณค่าของตัวแปรสถานะ x_1

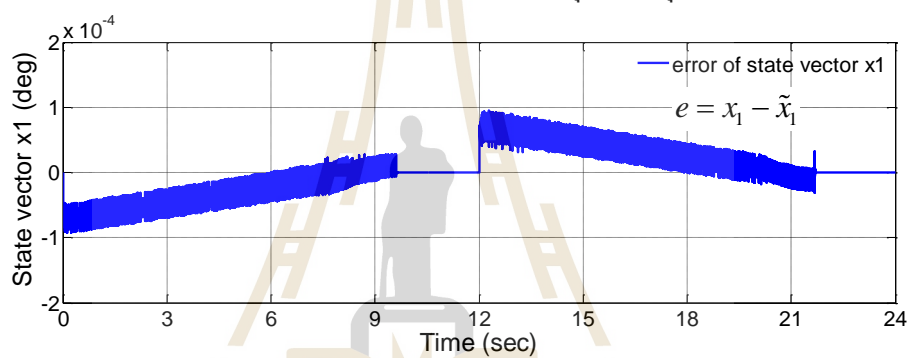


(ค) กราฟผลตอบสนองของการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

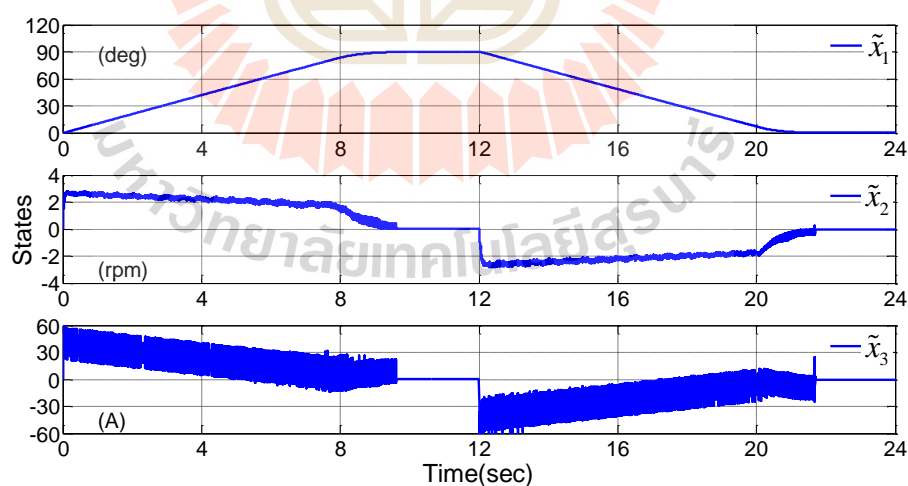
รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ



(ก) กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 2

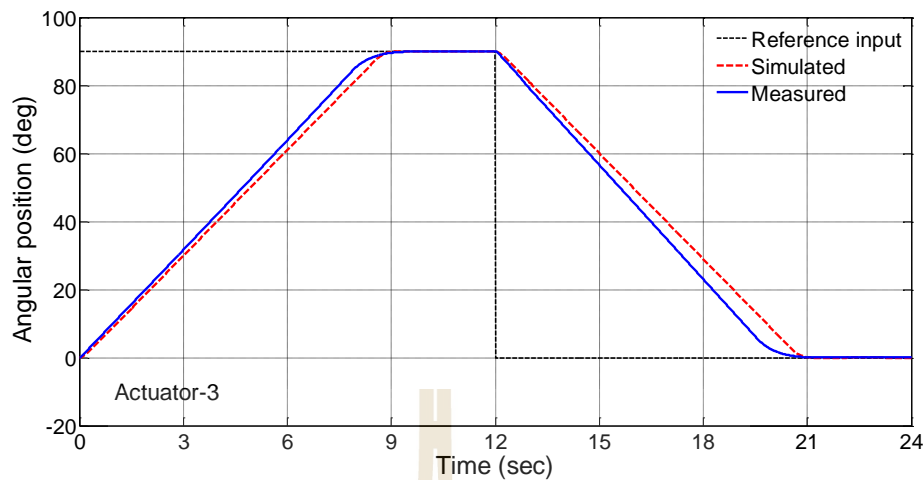


(ข) กราฟค่าผิดพลาดระหว่างการวัดกับการประมาณค่าของตัวแปรสถานะ x1

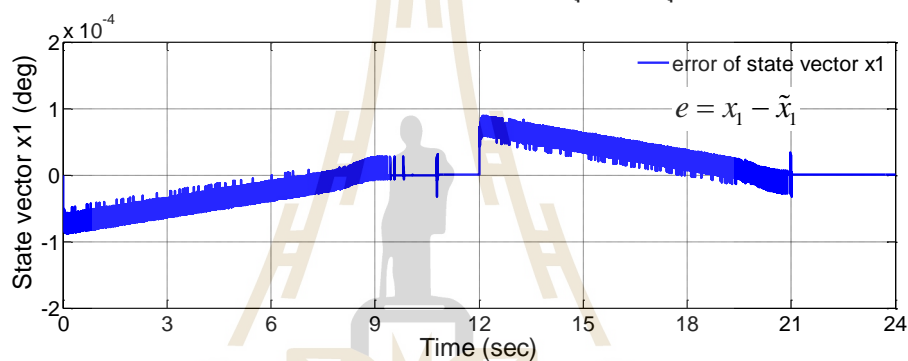


(ค) กราฟผลตอบสนองของการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

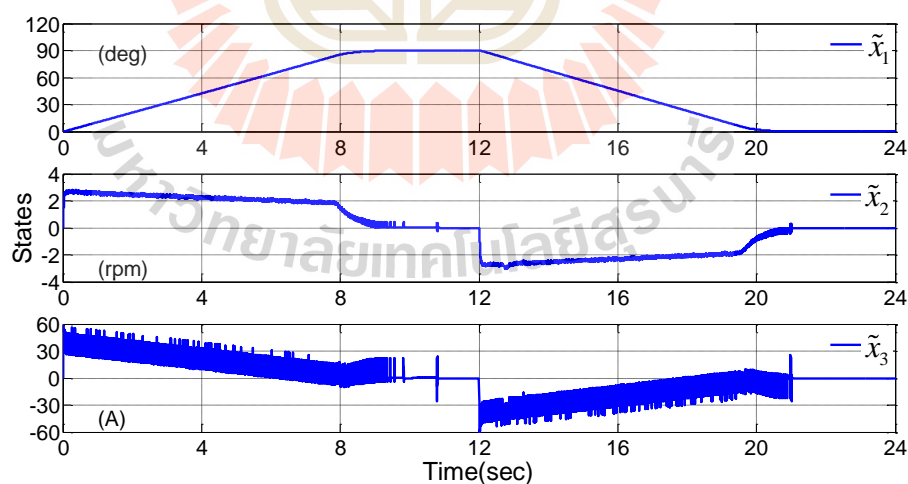
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 2 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ



(ก) กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 3



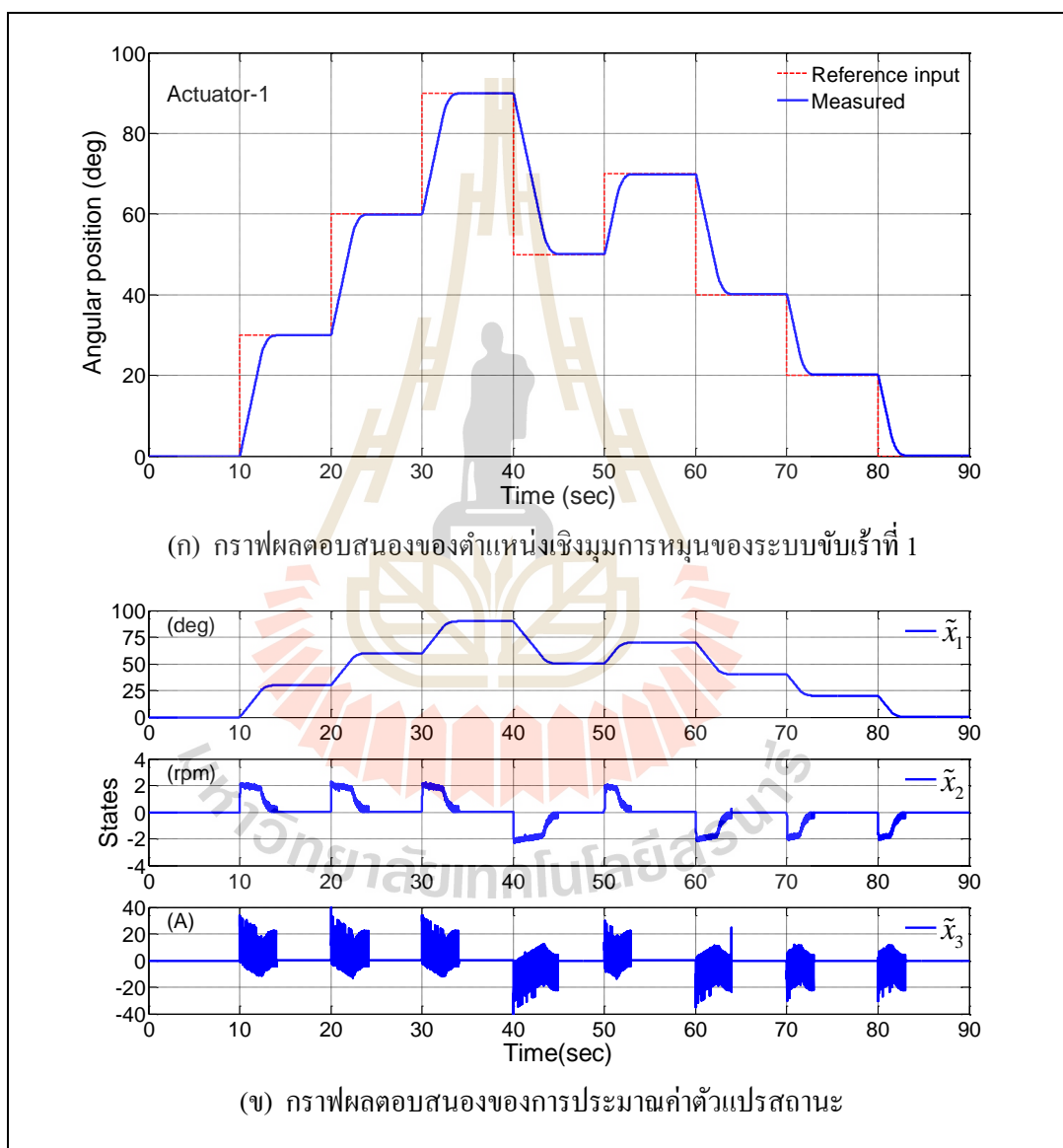
(ข) กราฟค่าผิดพลาดระหว่างการวัดกับการประมาณค่าของตัวแปรสถานะ x_1



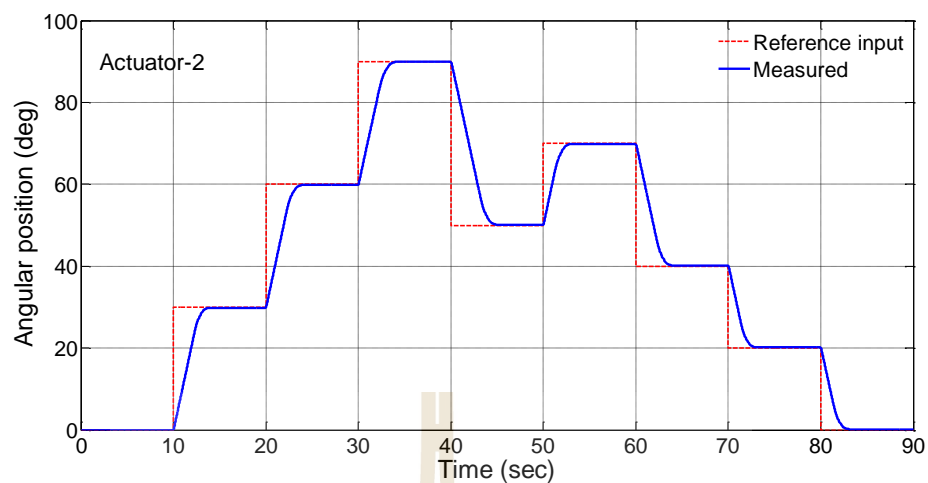
(ค) กราฟผลตอบสนองของการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 3 และตัวแปรสถานะ กำหนดอินพุตอ้างอิงที่ ± 90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

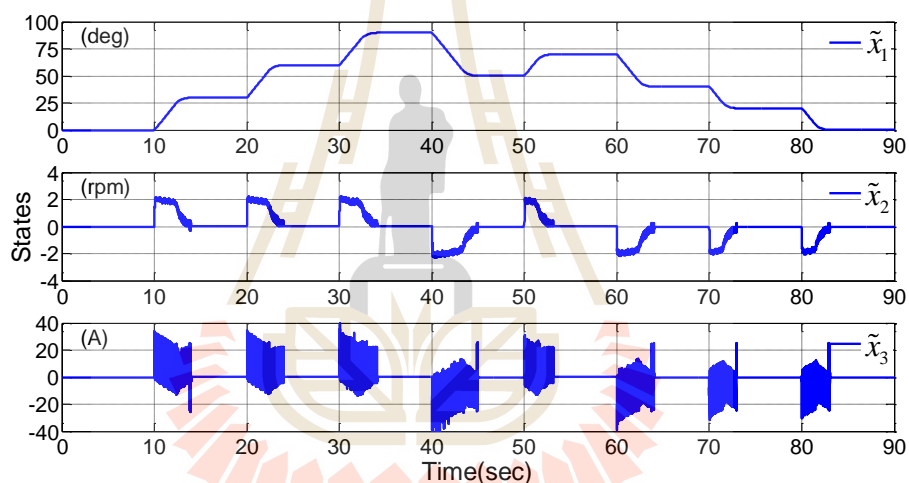
จากนั้นได้ทำการทดสอบการตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 โดยกำหนดแนววิถีอินพุตอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา โดยผลทดสอบแสดงได้ ดังกราฟรูปที่ 5.14 กราฟรูปที่ 5.15 และกราฟรูปที่ 5.16 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลตอบสนอง ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนสามารถตามรอยแนววิถีอินพุตอ้างอิงได้ทุกค่า ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน และ ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าอยู่ในช่วง ± 0.2 องศา



รูปที่ 5.14 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1 และตัวแปรสถานะ กำหนดแนววิถีอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

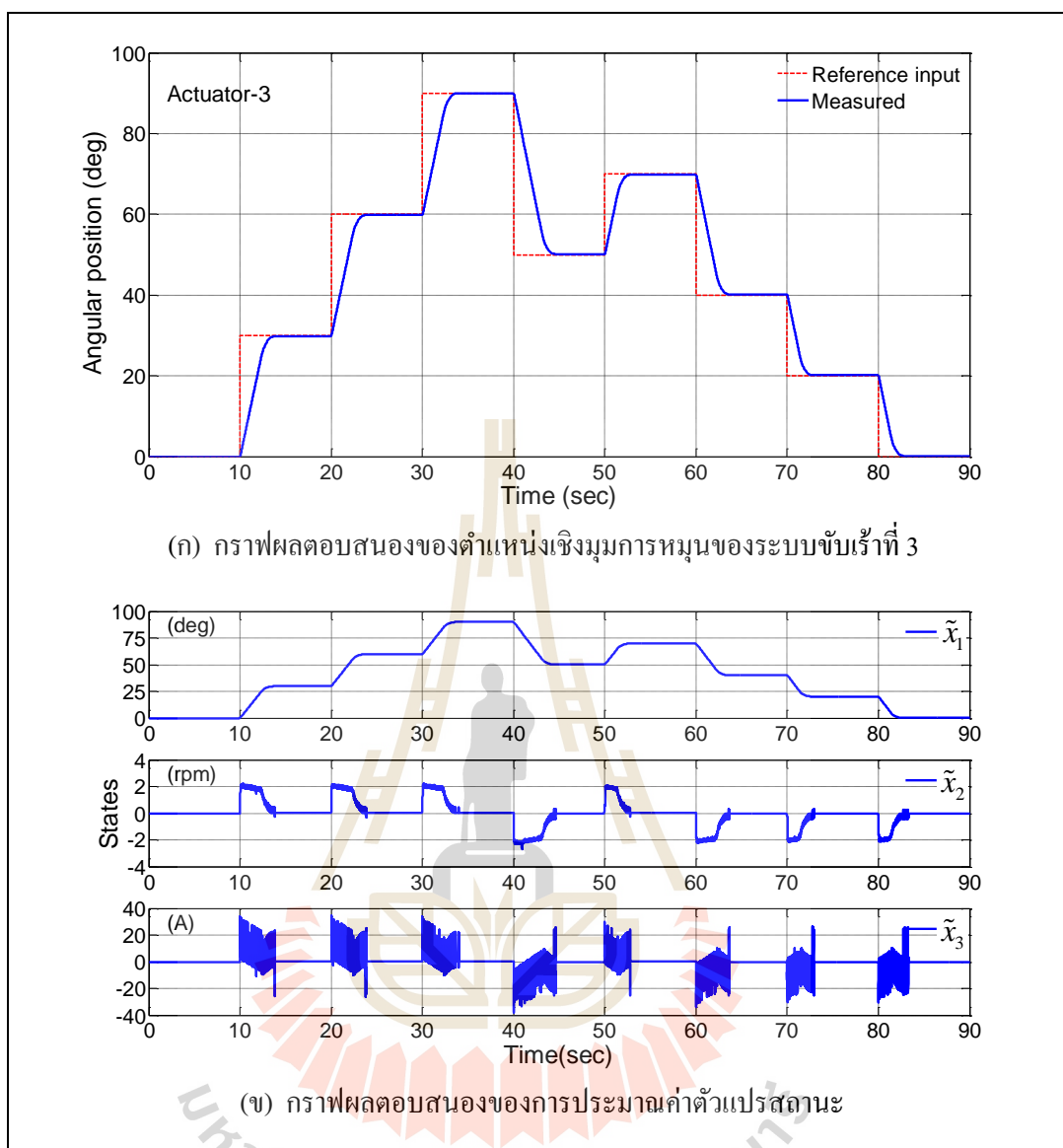


(ก) กราฟผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 2



(ข) กราฟผลตอบสนองของการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

รูปที่ 5.15 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 2 และตัวแปรสถานะ กำหนดแนววิถีของอินพุตอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ



รูปที่ 5.16 กราฟผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 3 และตัวแปรสถานะ กำหนดแนววิถีของอินพุตอ้างอิงไว้ในช่วง 0 องศา ถึง +90 องศา ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ

จากผลการทดสอบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ จะเห็นได้ว่าระบบมีความสามารถตามรอยแนววิถีอินพุตอ้างอิงได้ทุกค่าที่อยู่ในช่วง ± 90 องศา และให้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 0.2 องศา ซึ่งมีทั้งความละเอียดและแม่นยำสูง ดังนั้น ตัวควบคุมนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ขับเคลื่อนระบบแท่นรองรับแม่เหล็กได้

5.4 การทดสอบการเคลื่อนไหวมัดของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

ระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่ขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลางจำนวน 3 ชุด จะใช้การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ (ลูปลควบคุมด้านใน) และการควบคุมการเคลื่อนไหวมัดของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กจะใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (ลูปลควบคุมด้านนอก) ในการทดสอบการเคลื่อนไหวมัดจะทำการทดสอบทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต การรบกวนจากภายนอกที่เข้ามาในระบบจะสร้างได้จากการปรับตั้งน็อตปรับระดับทั้งสามตัวของตัวฐานรอง เพื่อสร้างสถานการณ์ให้พื้นอาคารเกิดการทรุดตัวขึ้น

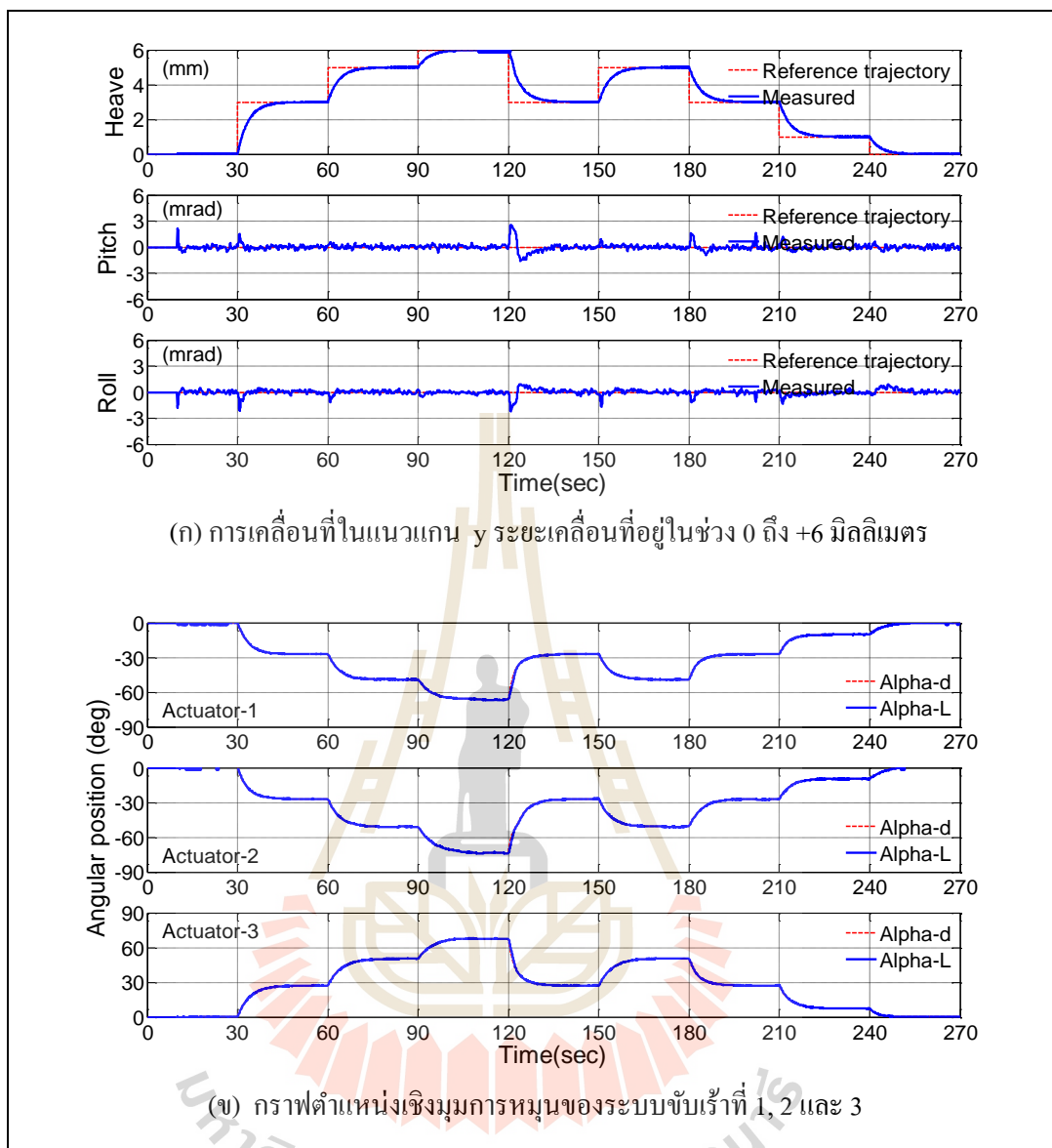
5.4.1 การควบคุมการเคลื่อนไหวนตามรอยแนววิถีอ้างอิง

การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนไหวนตามรอยแนววิถีอ้างอิงของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ จะใช้โปรแกรมการควบคุมดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 กำหนดให้ค่าอัตราขยายอินทิกรัล $K_{I1} = 0.4024$, $K_{I2} = 0.4026$ และ $K_{I3} = 0.4021$ (ลูปลควบคุมด้านนอก) ในส่วนการควบคุมลูปลด้านในได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 กำหนดให้การรบกวนจากภายนอก D_v , D_θ และ D_ϕ มีค่าเท่ากับศูนย์ การทดสอบมีดังต่อไปนี้ การเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) กำหนดให้แนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) กำหนดให้แนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง ± 20 มิลลิเรเดียน และการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) กำหนดให้แนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง ± 30 มิลลิเรเดียน

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุน (angular position) ของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิง (reference trajectory) อยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง ± 6 มิลลิเมตร กำหนดให้การหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll) มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.17 และกราฟรูปที่ 5.18 ตามลำดับ

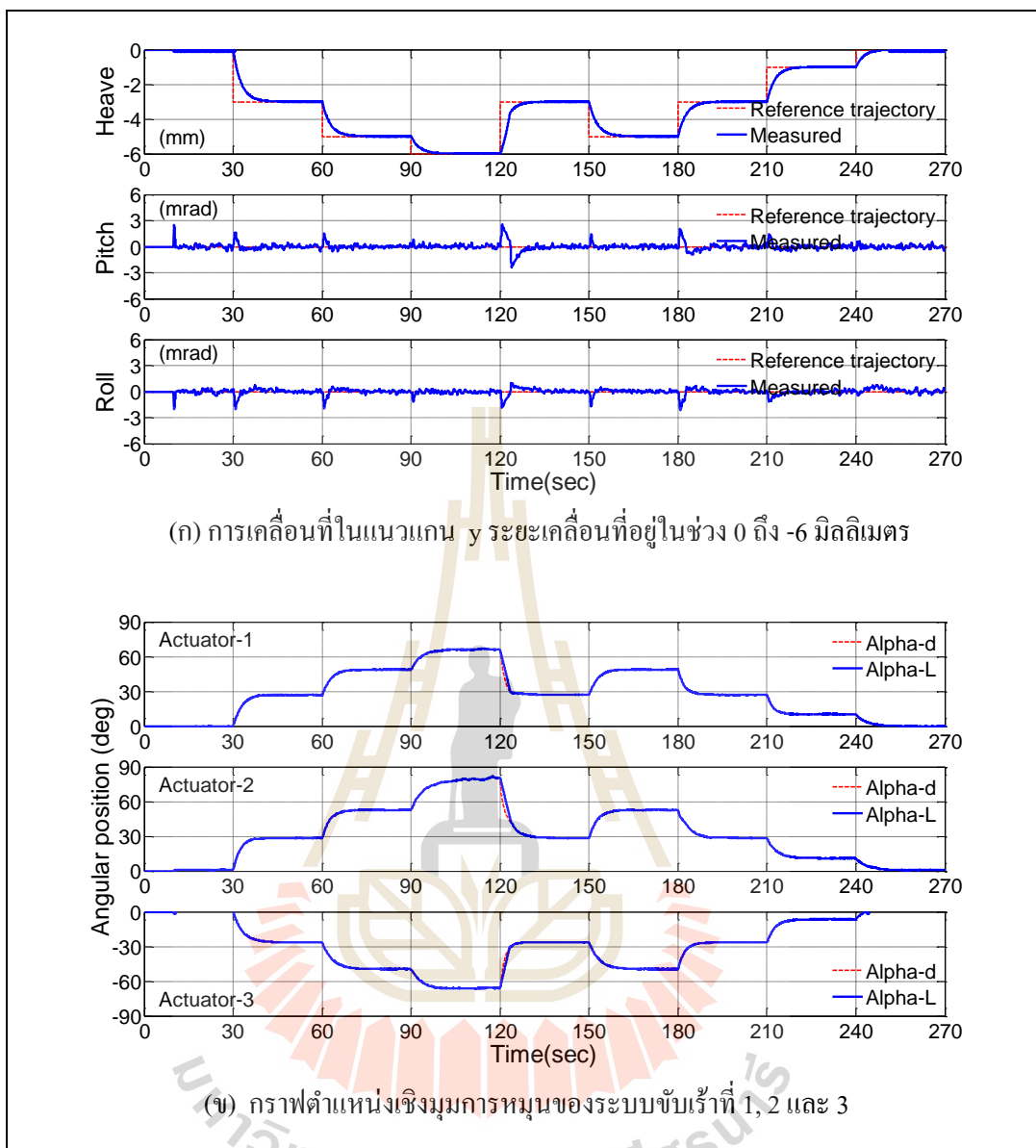
ผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน x และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง ± 20 มิลลิเรเดียน กำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวแกน y และการหมุนรอบแนวแกน z มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.19 และกราฟรูปที่ 5.20 ตามลำดับ

ผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน z และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 โดยกำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง ± 30 มิลลิเรเดียน กำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวแกน y และการหมุนรอบแนวแกน x มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.21 และกราฟรูปที่ 5.22 ตามลำดับ



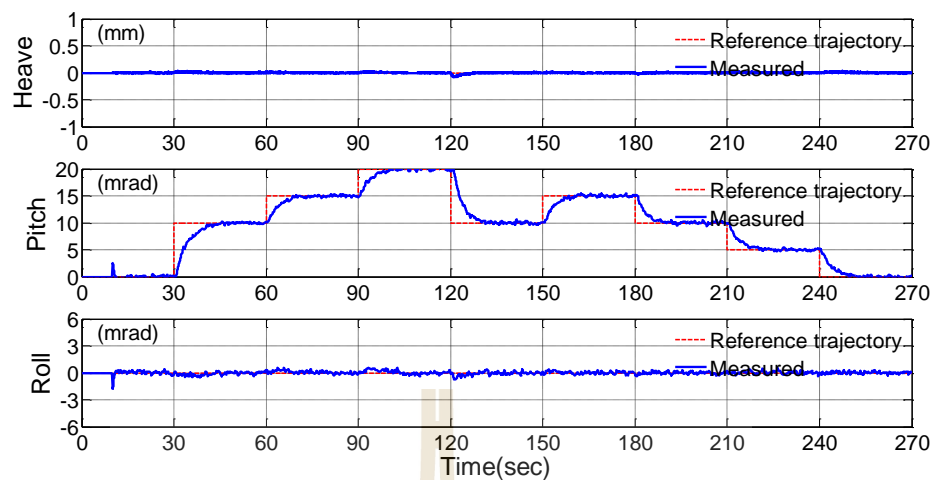
รูปที่ 5.17 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวนอน y (Heave) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง +6 มิลลิเมตร

กราฟรูปที่ 5.17 ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบ (measured) และแนววิถีอ้างอิง (reference trajectory) จะเห็นได้ว่าระบบขับเคลื่อนที่ 1 และ 2 จะหมุนไปในทิศทางเดียวกัน และค่ามุมใกล้เคียงกัน ส่วนระบบขับเคลื่อนที่ 3 จะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน โดยที่อินพุตอ้างอิงของระบบขับเคลื่อนที่ 3 คือ Alpha-d ได้จากสมการจลนศาสตร์ผกผัน และเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อนที่ 3 คือ Alpha-L

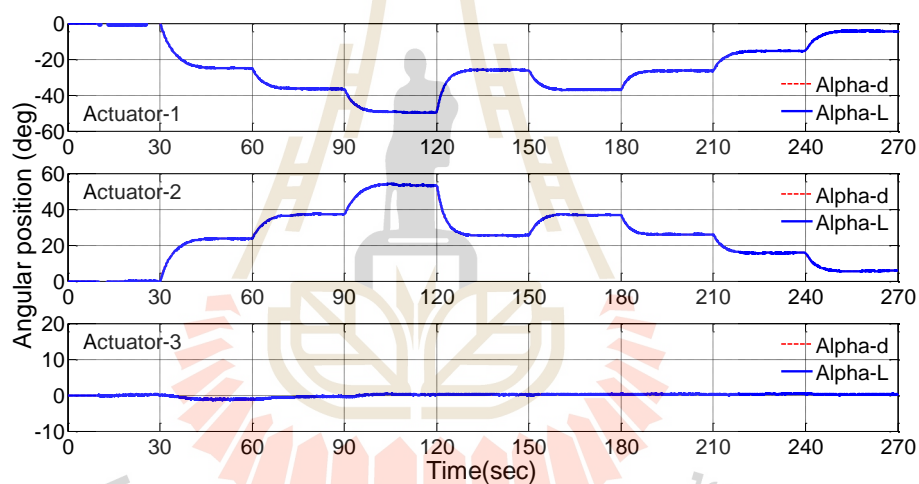


รูปที่ 5.18 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง -6 มิลลิเมตร

กราฟรูปที่ 5.17 และกราฟรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) ตามรอยแนววิถีอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้ทุกค่า และให้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 0.01 มิลลิเมตร ขณะที่ค่ามุมการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll) มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์

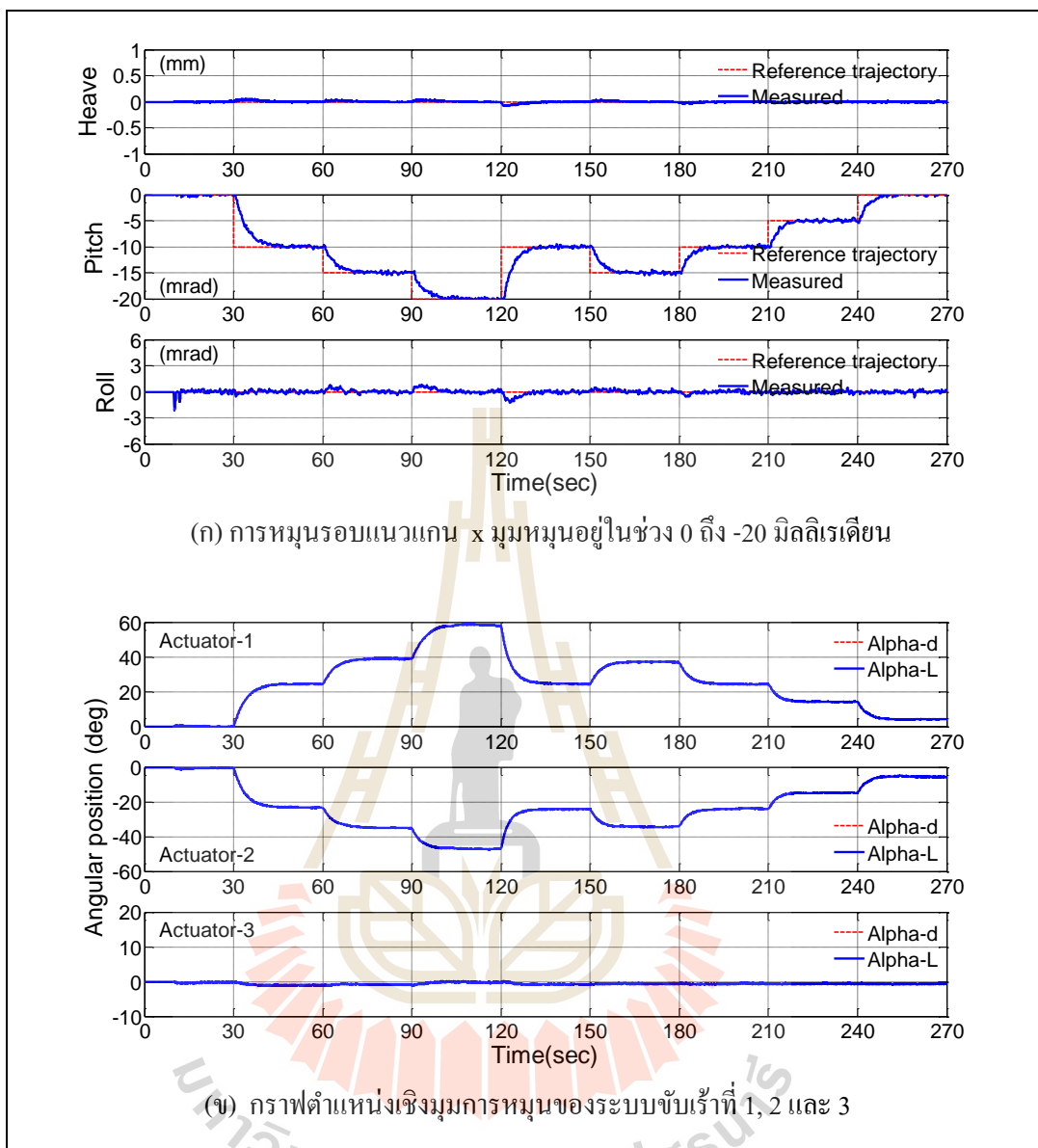


(ก) การหมุนรอบแนวแกน x มุมหมุนอยู่ในช่วง 0 ถึง +20 มิลลิเรเดียน



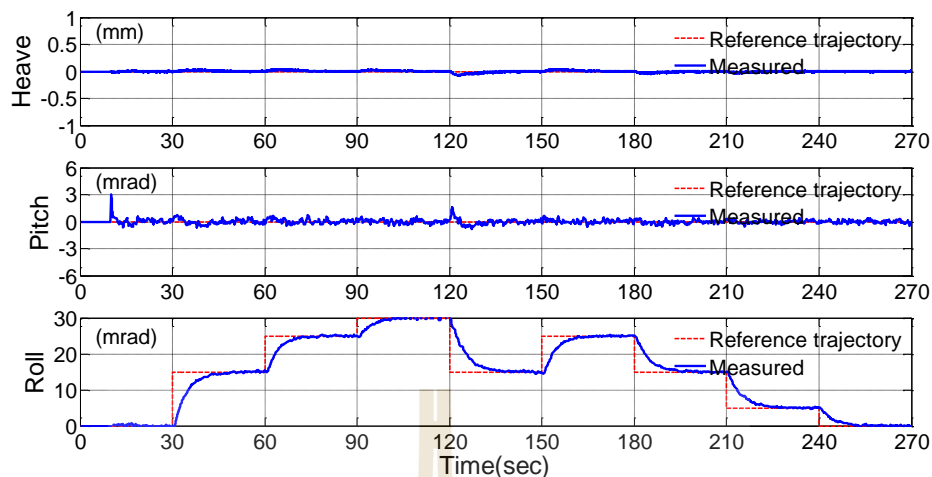
(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 5.19 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง +20 มิลลิเรเดียน

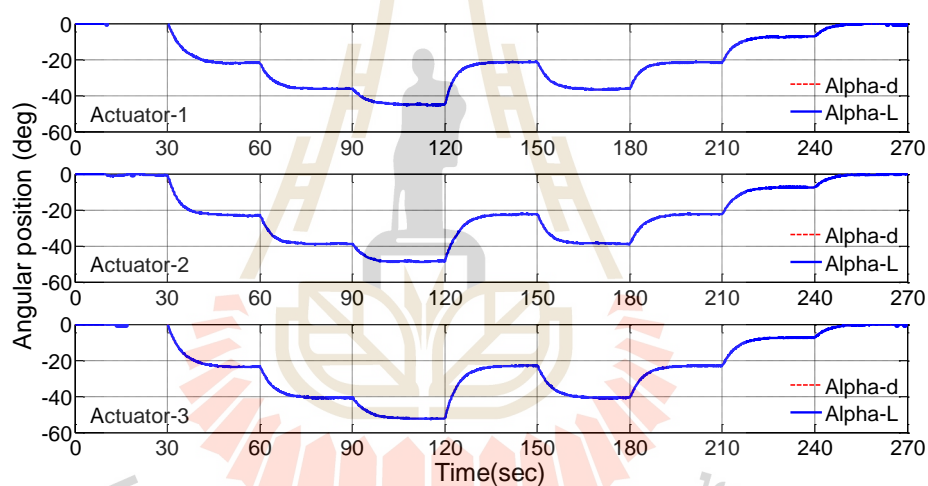


รูปที่ 5.20 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -20 มิลลิเรเดียน

กราฟรูปที่ 5.19 และกราฟรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) ตามรอยแนววิถีอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้ทุกค่า และให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 0.6 มิลลิเรเดียน ขณะที่การเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) และการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ และเอาต์พุตของระบบมีค่าเวลาประวิงประมาณ 450 มิลลิวินาที

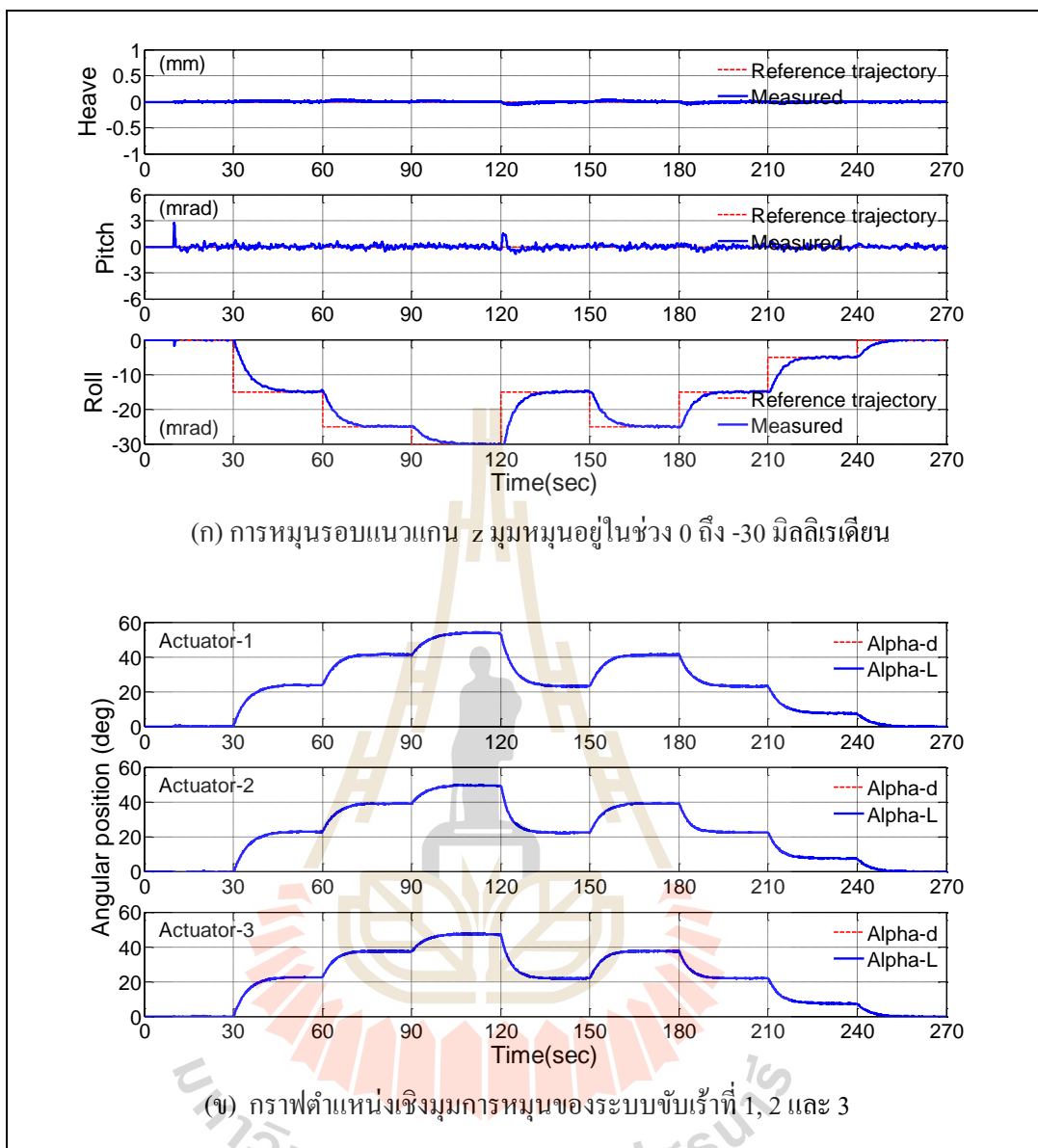


(ก) การหมุนรอบแนวแกน z มุมหมุนอยู่ในช่วง 0 ถึง +30 มิลลิเรเดียน



(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 5.21 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 ถึง +30 มิลลิเรเดียน

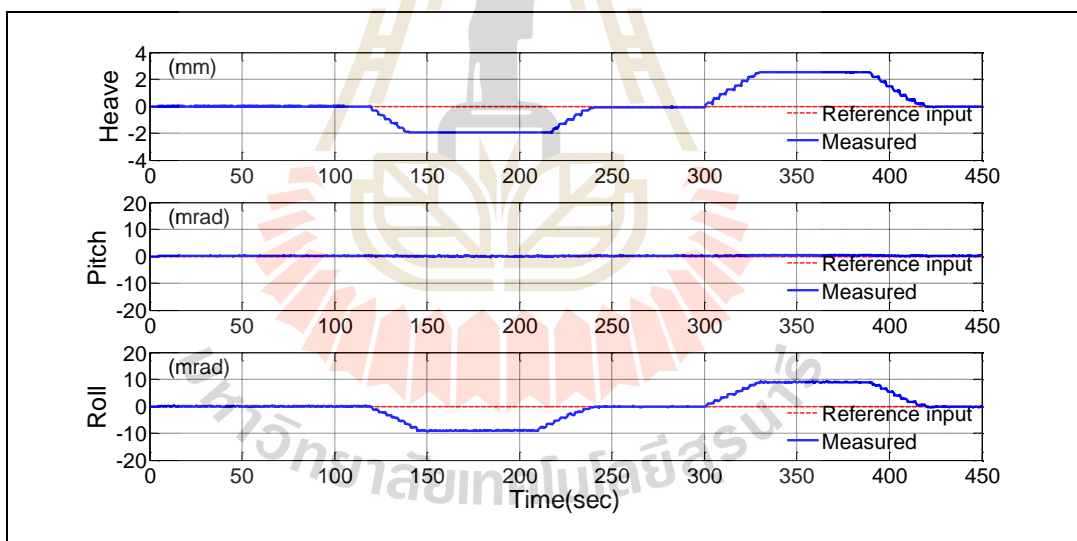


รูปที่ 5.22 กราฟผลการทดสอบการหมุนรอบแนวแกน z (Roll) และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 กำหนดแนววิถีอ้างอิงอยู่ในช่วง 0 มิลลิเรเดียน ถึง -30 มิลลิเรเดียน

กราฟรูปที่ 5.21 และกราฟรูปที่ 5.22 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กหมุนรอบแนวแกน z (Roll) ตามรอยแนววิถีอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้ทุกค่า และให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 0.6 มิลลิเรเดียน ขณะที่การเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave) และการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ และเอาต์พุตของระบบมีค่าเวลาประวิงประมาณ 450 มิลลิวินาที

5.4.2 การควบคุมการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต

การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุตของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ จะใช้โปรแกรมการควบคุมดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 กำหนดให้ค่าอัตราขยายอินทิกรัล $K_{I1} = 0.4024$, $K_{I2} = 0.4026$ และ $K_{I3} = 0.4021$ (ดูปควบคุมด้านนอก) ในส่วนการควบคุมลูปด้านในได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 กำหนดอินพุตอ้างอิง v_d , θ_d และ ϕ_d มีค่าคงที่ไว้ (reference input) โดยเอาต์พุตของระบบ v_L , θ_L และ ϕ_L (measured) ใช้การปรับตั้งตัวปรับระดับของตัวฐานรองเพื่อสร้างการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบ และตำแหน่งของตัวปรับระดับ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 การรบกวนจากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1, 2 และ 3 โดยทำการปรับขึ้นและลงประมาณ ± 5 มิลลิเมตร ทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนไหวได้ ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 5.23 กราฟรูปที่ 5.24 และกราฟรูปที่ 5.25 ตามลำดับ โดยสัญญาณดังในกราฟเราเรียกว่าการรบกวนจากภายนอกที่จะเข้ามาในระบบ (จำลองสถานการณ์ให้พื้นอาคารเกิดการทรุดตัว) ขณะที่ทำการสร้างสัญญาณการรบกวนจากภายนอกจะยังไม่ใช้งานระบบควบคุม



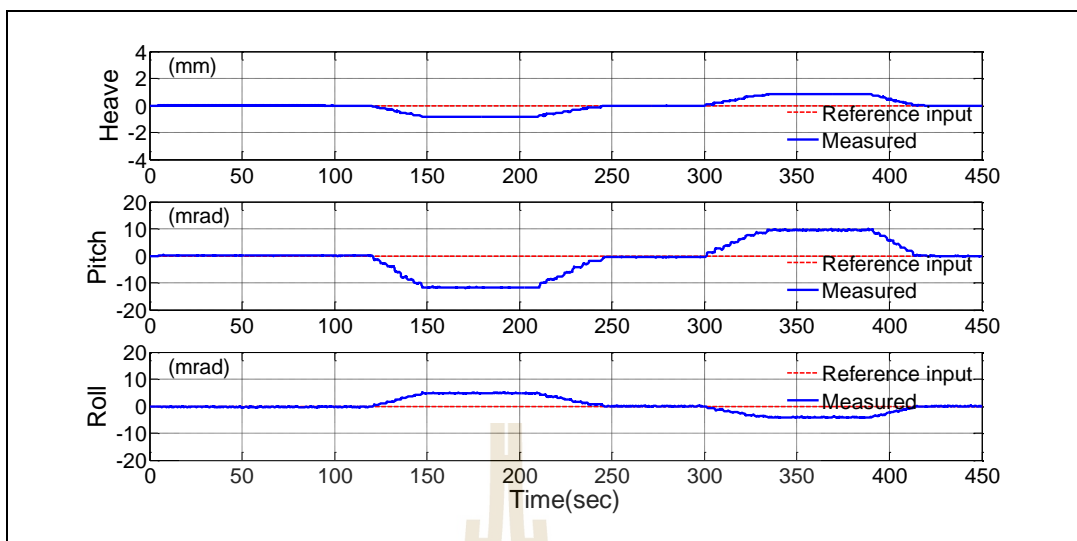
รูปที่ 5.23 กราฟการรบกวนจากภายนอกที่ได้จากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1

เวลาที่ 120 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 5 มิลลิเมตร

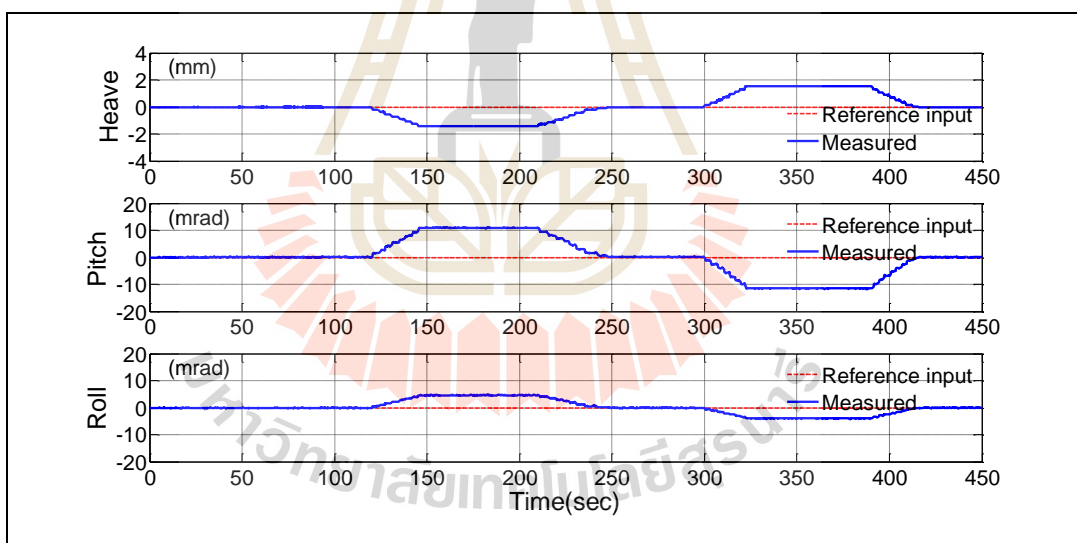
เวลาที่ 210 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 5 มิลลิเมตร

เวลาที่ 300 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 5 มิลลิเมตร และ

เวลาที่ 390 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 5 มิลลิเมตร



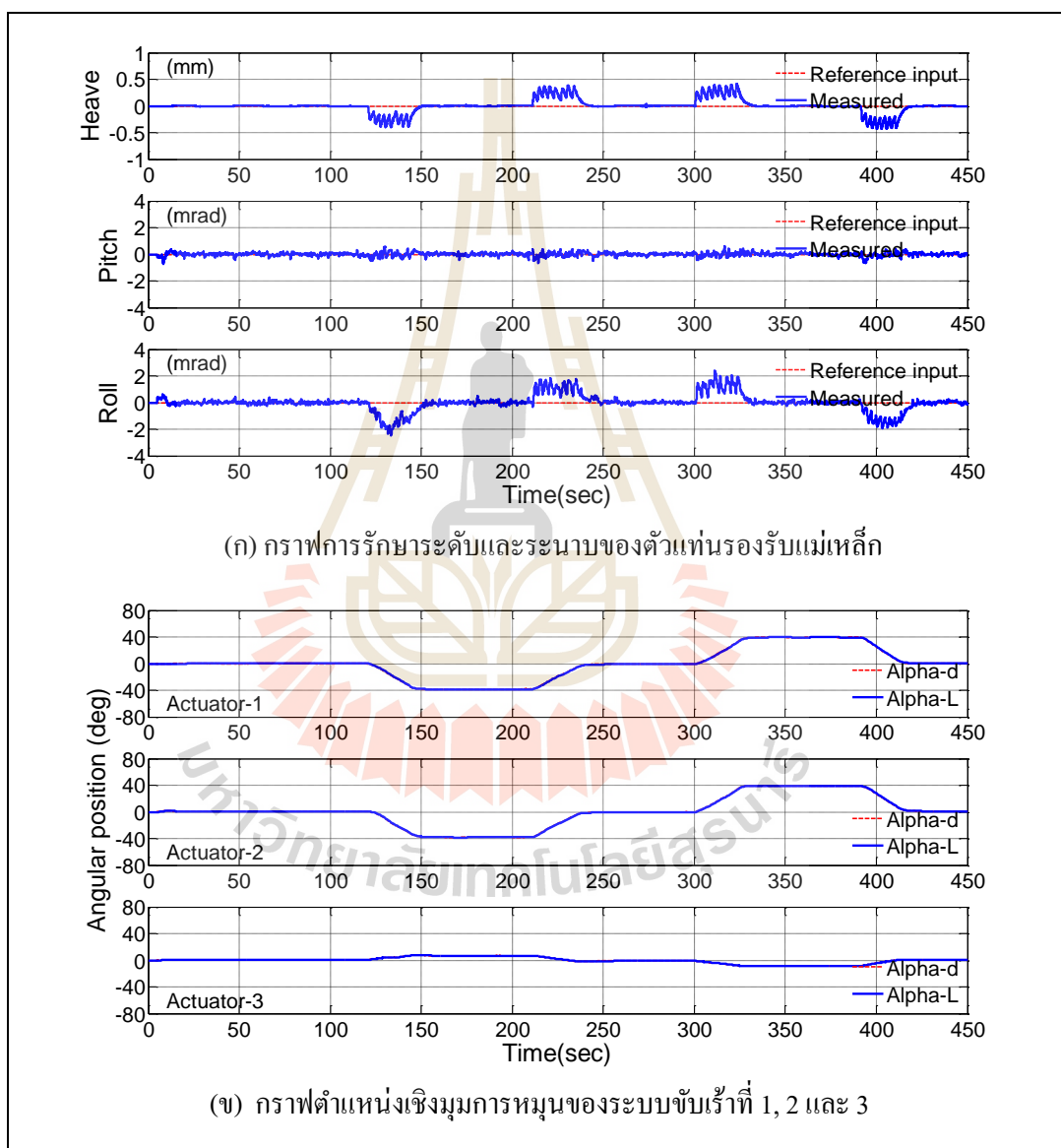
รูปที่ 5.24 กราฟการรบกวนจากภายนอกที่ได้จากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 2



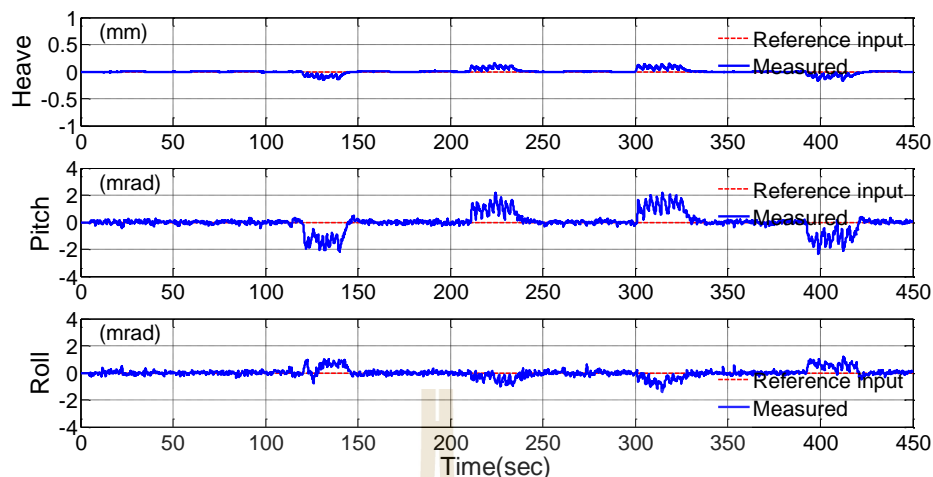
รูปที่ 5.25 กราฟการรบกวนจากภายนอกที่ได้จากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 3

กราฟรูปที่ 5.24 และกราฟรูปที่ 5.25 ใช้การปรับตั้งเหมือนกันกับกราฟรูปที่ 5.23 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1 จะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ในแนวแกน y และการหมุนรอบแนวแกน z เท่านั้น และเมื่อทำการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 2 และ 3 จะส่งผลต่อทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z

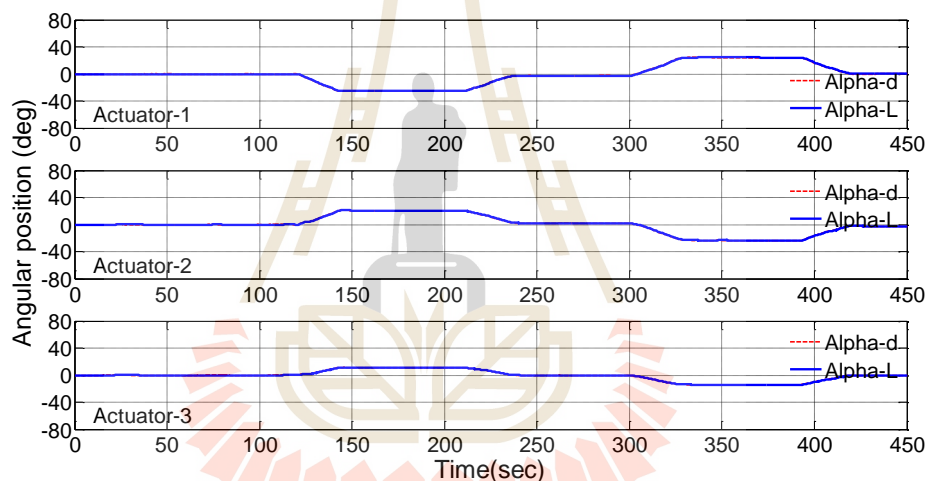
จากนั้นทำการทดสอบการเคลื่อนไหวอัตโนมัติแบบคงค่าเอาต์พุต เมื่อมีสัญญาณการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบ ด้วยการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1, 2 และ 3 ดังที่แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 5.23 กราฟรูปที่ 5.24 และกราฟรูปที่ 5.25 ตามลำดับ ผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3 แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.26 กราฟรูปที่ 5.27 และกราฟรูปที่ 5.28 ตามลำดับ



รูปที่ 5.26 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกจากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1 และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือที่ 1, 2 และ 3



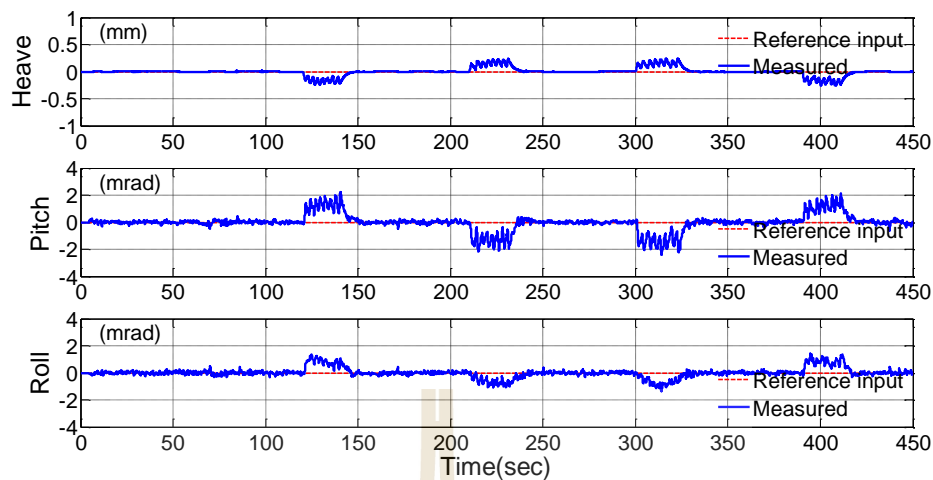
(ก) กราฟการรักษาระดับและระนาบของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก



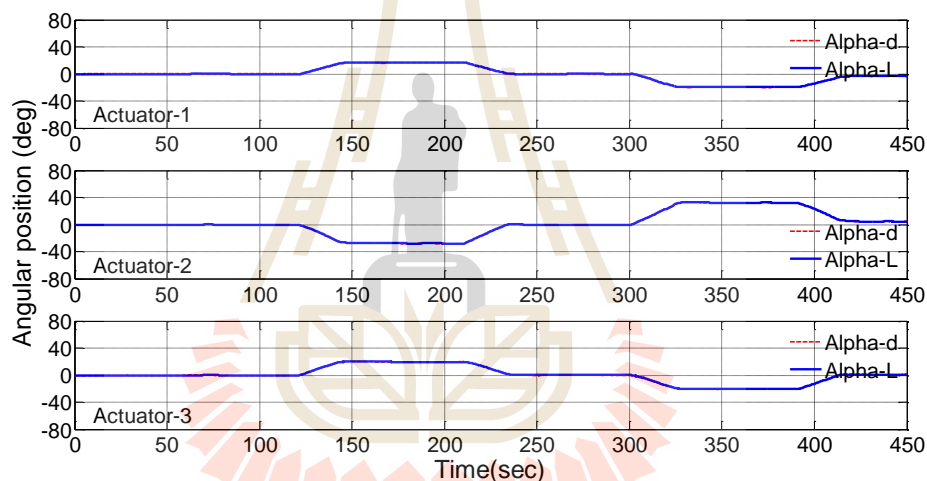
(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 5.27 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอ้าต์พุต เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกจากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 2 และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

จากกราฟรูปที่ 5.26 กราฟรูปที่ 5.27 และกราฟรูปที่ 5.28 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กรักษาทั้งระดับและระนาบให้คงที่ได้ ตามค่าอินพุตอ้างอิง เมื่อระบบได้รับการรบกวนจากภายนอกเข้ามาจากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยค่า v_L , θ_L และ ϕ_L เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวแล้วมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์



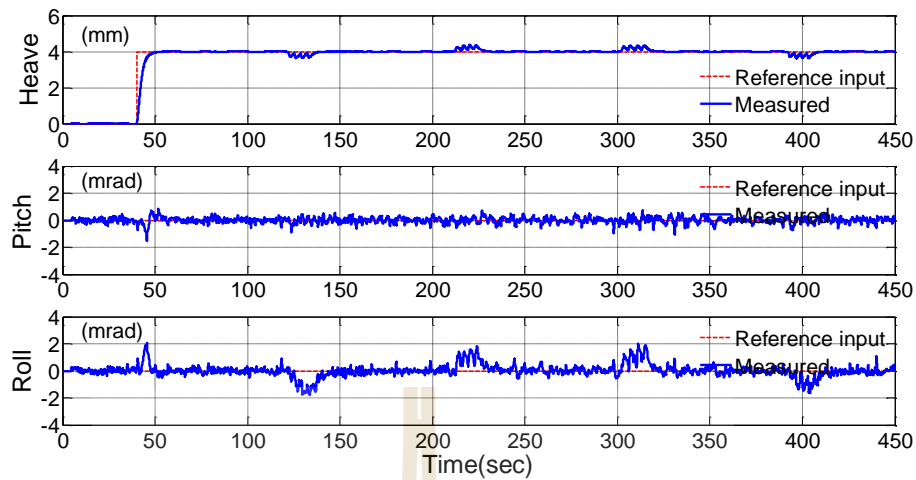
(ก) กราฟการรักษาระดับและระนาบของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก



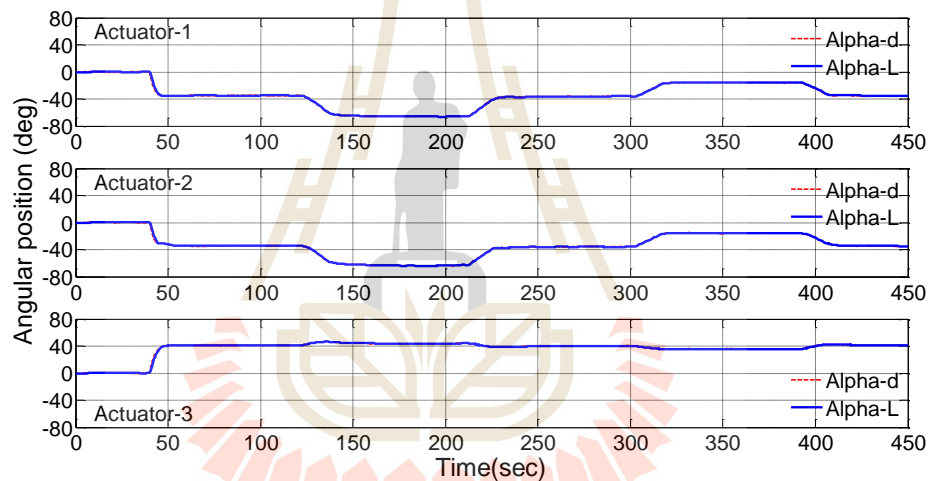
(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 5.28 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอ้าต์พุต เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก จากการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 3 และผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

จากนั้นทำการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอ้าต์พุต โดยกำหนดให้อินพุตอ้างอิง ค่า v_d เท่ากับ +4 มิลลิเมตร θ_d และ ϕ_d ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสร้างการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบด้วยการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1, 2 และ 3 ผลการทดสอบแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.29 กราฟรูปที่ 5.30 และกราฟรูปที่ 5.31 ตามลำดับ



(ก) กราฟการรักษาระดับและระนาบของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก



(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 5.29 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต กำหนดให้การเคลื่อนที่ใน

แนวแกน $y + 4$ มิลลิเมตร สร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้งตัว
ปรับระดับที่ 1 และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

(การสร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 1)

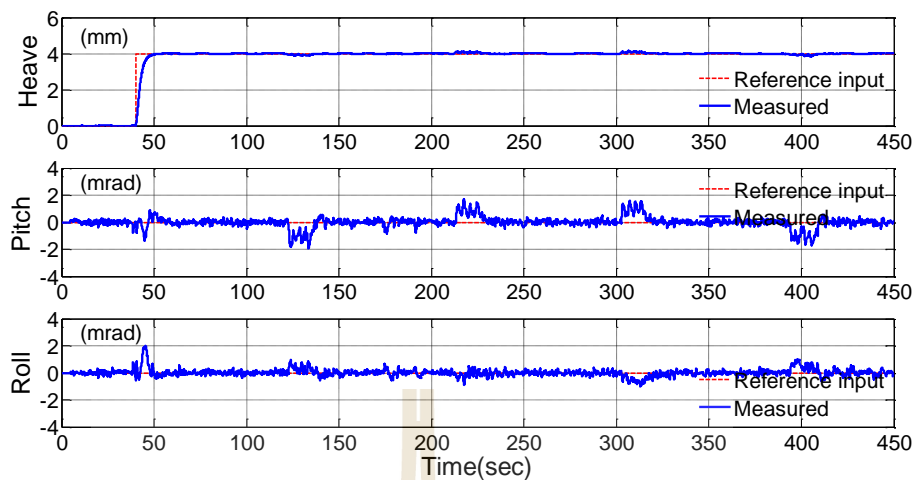
เวลาที่ 40 วินาที ปรับการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ไปอยู่ที่ค่า $+4$ มิลลิเมตร

เวลาที่ 120 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 2.5 มิลลิเมตร

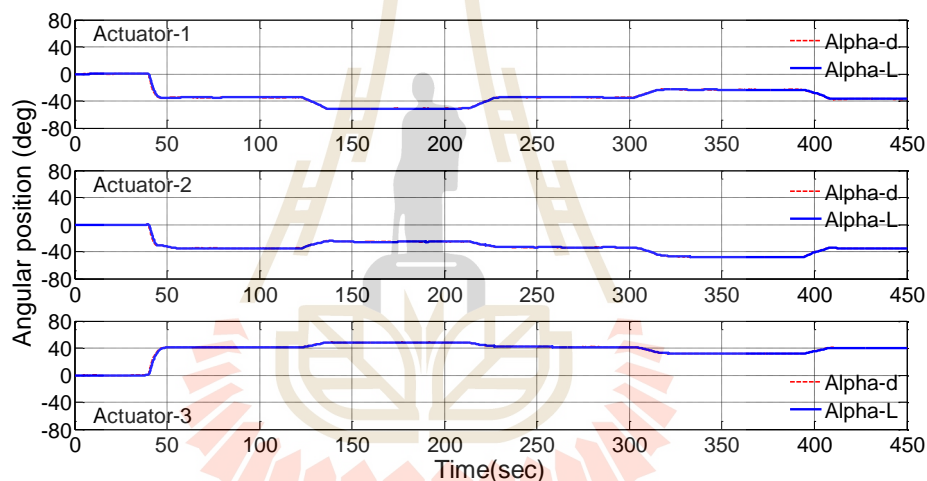
เวลาที่ 210 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 2.5 มิลลิเมตร

เวลาที่ 300 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 2.5 มิลลิเมตร และ

เวลาที่ 390 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 2.5 มิลลิเมตร

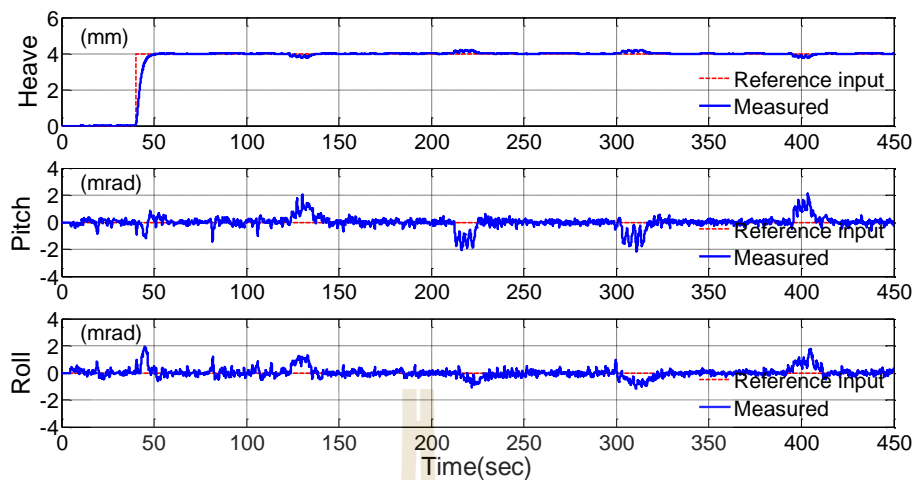


(ก) กราฟการรักษาระดับและระนาบของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก

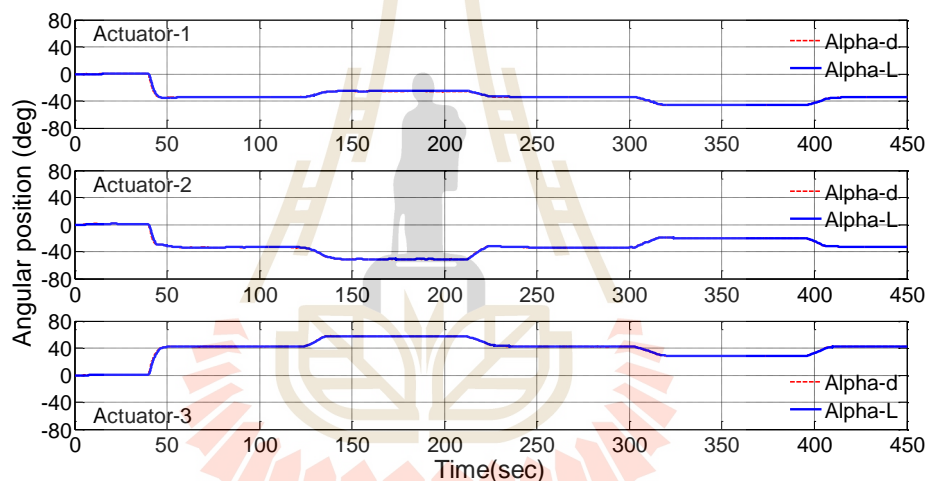


(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 5.30 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต กำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวแกน $y + 4$ มิลลิเมตร สร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 2 และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 (การสร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 2) เวลาที่ 40 วินาที ปรับการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ไปอยู่ที่ค่า $+4$ มิลลิเมตร เวลาที่ 120 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 2.5 มิลลิเมตร เวลาที่ 210 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 2.5 มิลลิเมตร เวลาที่ 300 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 2.5 มิลลิเมตร และ เวลาที่ 390 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 2.5 มิลลิเมตร



(ก) กราฟการรักษาระดับและระนาบของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก



(ข) กราฟตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

รูปที่ 5.31 กราฟผลการทดสอบการเคลื่อนไหวแบบคงค่าเอาต์พุต กำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวแกน $y + 4$ มิลลิเมตร สร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 3 และตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3 (การสร้างการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับตั้งตัวปรับระดับที่ 3)

เวลาที่ 40 วินาที ปรับการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ไปอยู่ที่ค่า $+4$ มิลลิเมตร
 เวลาที่ 120 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 2.5 มิลลิเมตร
 เวลาที่ 210 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 2.5 มิลลิเมตร
 เวลาที่ 300 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับขึ้น 2.5 มิลลิเมตร และ
 เวลาที่ 390 วินาที ปรับตั้งตัวปรับระดับลง 2.5 มิลลิเมตร

5.5 สรุป

การทดสอบการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ ที่ออกแบบไว้และจัดสร้างขึ้น โดยติดตั้งอุปกรณ์และตัวตรวจวัดค่าต่าง ๆ เข้ากับบอร์ดควบคุม แพลตฟอร์มของ RAPCON ต่อประสานเข้ากับคอมพิวเตอร์ และเขียนโปรแกรมควบคุมด้วย MATLAB/Simulink และ RAPCON การทดสอบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเรือ (ลูปลควบคุมด้านใน) ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ กำหนดให้ค่าอัตราขยายพีไอคงที่ โดยผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนในช่วง ± 90 องศา ให้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว อยู่ในช่วง ± 1.3 องศา และการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ กำหนดให้ค่าอัตราขยายป้อนกลับสถานะและค่าอัตราขยาย ตัวสังเกตคงที่ โดยผลตอบสนองของตำแหน่งเชิงมุมการหมุนในช่วง ± 90 องศา ให้ค่าผิดพลาด ในสภาวะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 0.2 องศา จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองดังกล่าวมีความละเอียดและ แม่นยำสูง ดังนั้น ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการขับเคลื่อนระบบแท่นรองรับแม่เหล็กได้

การทดสอบการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ใช้ตัวควบคุม แบบอินทิกรัล (ลูปลควบคุมด้านนอก) กำหนดให้อัตราขยายอินทิกรัลคงที่ การควบคุมการ เคลื่อนไหวอัตโนมัติแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิง ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่ ในแนวแกน y ที่ ระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร หมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ที่มุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และ ± 30 มิลลิเรเดียน ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ได้ ให้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของ การเคลื่อนที่อยู่ในช่วง ± 0.01 มิลลิเมตร และของการหมุนอยู่ในช่วง ± 0.6 มิลลิเรเดียน การควบคุม การเคลื่อนไหวอัตโนมัติแบบคงค่าเอาต์พุต เมื่อสร้างการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบแล้ว ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถรักษาทั้งระดับและระนาบให้คงที่ได้เป็นอย่างดีเยี่ยม

จากผลการทดสอบการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ระบบ มีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกถูกจำกัดขอบเขต เพราะว่าเมื่อจำกัดขอบเขตของ สัญญาณที่ป้อนเข้าระบบแล้ว ทำให้ได้สัญญาณออกถูกจำกัดขอบเขตไปด้วย และระบบยังมี เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์ เนื่องจากเมื่อกำหนดสัญญาณเข้าเป็นศูนย์แล้ว และมีการรบกวน เกิดขึ้นในระบบ เมื่อเวลาผ่านไปผลตอบสนองของสัญญาณออกมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ได้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของแท่นรองรับแม่เหล็กที่เคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน y หมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ได้ เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถควบคุมให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ ทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต การเคลื่อนไหวมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ และพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กและระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้ การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ สามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังต่อไปนี้

6.1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาได้รายงานไว้ในบทที่ 1 เมื่อพิจารณาการปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน เกิดการทรุดและเลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องทุกปี การปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้อง เพื่อให้การผลิตแสงซินโครตรอนมีประสิทธิภาพและการให้บริการแสงแก่ผู้ใช้งานวิจัยต่าง ๆ ได้อย่างต่อเนื่อง การดำเนินงานดังกล่าวใช้บุคลากรที่มีประสบการณ์และความชำนาญจำนวนมาก การปรับตั้งให้มีความแม่นยำต่ำ และใช้ระยะเวลานานหลายเดือน โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เพื่อดำเนินการออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ เพื่อเป็นเครื่องต้นแบบในการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

6.1.2 ปรัชญาวัตรกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้เรียบเรียงไว้ในบทที่ 2 หลักการและเทคนิควิธีการปรับตั้งตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก การควบคุมการเคลื่อนที่และการหมุนจะใช้การเขียนโปรแกรมคำสั่งควบคุมการทำงานที่ผู้เขียนต้องอาศัยทั้งประสบการณ์และความชำนาญสูง ทำการศึกษาการควบคุมแบบดั้งเดิมที่อาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนและตัวควบคุมแบบพีไอดี การควบคุมสมัยใหม่ที่อาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะ สภาพควบคุมได้และสภาพสังเกตได้ของระบบพลวัต การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะด้วยวิธีวางตำแหน่งโพลวงปิด การออกแบบตัวสังเกตสถานะ การทำระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น การหาค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว

การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าสัญญาณออกแบบจำกัดขอบเขต และเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์ เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย

6.1.3 การออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก 3 องศาอิสระ นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กได้รับการขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง จำนวน 3 ชุด เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการจลนศาสตร์ และสมการจลนศาสตร์ผกผันของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนดำเนินการจัดสร้างชิ้นงานและประกอบติดตั้ง การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบขับเคลื่อน และการเคลื่อนไหวยของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก แล้วเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประมาณขึ้นมีความถูกต้องและเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติได้

6.1.4 การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหวยอัตโนมัติได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 การวัดค่าและการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบขับเคลื่อน การออกแบบการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน (ลู่วัดควบคุมด้านใน) ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดให้กับอัตราขยายพีไอ และตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ ใช้วิธีการวางตำแหน่งโพลวงปิดของระบบ ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของเรทท์และทฤษฎีบทเลียปูนอฟ จำลองสถานการณ์เพื่อดูผลตอบสนองตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน การออกแบบการควบคุมการเคลื่อนไหวยอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก (ลู่วัดควบคุมด้านนอก) ด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดให้กับอัตราขยายอินทิกรัล สมการจลนศาสตร์ผกผันถูกนำมาใช้คำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อน และสมการจลนศาสตร์ถูกนำมาใช้แทนตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กในโดเมน z แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง จำลองสถานการณ์เพื่อดูผลตอบสนองของการเคลื่อนไหวยอัตโนมัติทั้งแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงและแบบคงค่าเอาต์พุต โดยผลที่ได้ระบบควบคุมมีความสามารถทำให้ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กเคลื่อนไหวยอัตโนมัติได้ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ และจำลองสถานการณ์การตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้

6.1.5 การทดสอบการเคลื่อนไหวยอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 การควบคุมตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบขับเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 90 องศา เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และกำหนดให้อัตราขยายพีไอคงที่ ผลตอบสนองให้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 1.3 องศา และเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ กำหนดให้อัตราขยายการป้อนกลับสถานะและอัตราขยายตัวสังเกตคงที่ ผลตอบสนองให้ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 0.2 องศา ทำให้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ

สถานะร่วมกับตัวสังเกตสถานะแบบเต็มอันดับ มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การควบคุม การเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และกำหนดให้อัตราขยายอินทิกรัลคงที่ ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติแบบตามรอยแนววิถีอ้างอิงได้ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่ระยะเคลื่อนที่ ± 6 มิลลิเมตร การหมุนรอบแนวแกน x และแนวแกน z ที่มุมหมุน ± 20 มิลลิเรเดียน และ ± 30 มิลลิเรเดียน ตามค่าพิกัดที่กำหนดไว้ได้ ให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง ± 0.01 มิลลิเมตร และของการหมุนอยู่ในช่วง ± 0.6 มิลลิเรเดียน และการเคลื่อนไหวอัตโนมัติแบบคงค่าเอาต์พุต เมื่อสร้างการรบกวนจากภายนอกเข้ามาในระบบแล้ว ตัวแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถรักษาทั้งระดับและระนาบให้คงที่ได้เป็นอย่างดีเยี่ยม โดยระบบแท่นรองรับแม่เหล็กสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามที่ต้องการ อีกทั้งระบบแท่นรองรับแม่เหล็กยังมีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกถูกจำกัดขอบเขต และมีเสถียรภาพแบบสัญญาณเข้าศูนย์

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต สำหรับระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 องศาอิสระ โดยขนาดของตัวโครงสร้างระบบและตำแหน่งการติดตั้งระบบขับเคลื่อนสามารถปรับเปลี่ยนได้ และขนาดของระบบขับเคลื่อนจะขึ้นกับการรองรับน้ำหนักของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก
- ได้ระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก ทั้งการปรับตั้งตัวแท่นรองรับแม่เหล็กให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ และการรักษาระดับและระนาบของตัวแท่นรองรับแม่เหล็กให้คงที่ได้
- ได้เครื่องต้นแบบของระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีความสามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติ 3 องศาอิสระ และเกิดพัฒนาการทางเทคโนโลยีการสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กและระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ต้องการได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์และผลที่ได้ ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไป ดังนี้

6.2.1 การออกแบบระบบขับเคลื่อนด้วยลูกเบี้ยววงกลมแบบเยื้องศูนย์กลาง ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ทำแกนเพลาลูกเบี้ยววงกลมที่สามารถรองรับน้ำหนักได้สูง การใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนและชุดเฟืองส่งกำลังที่ให้ความละเอียดสูง การใช้ตัวตรวจวัดตำแหน่งเชิงมุม การหมุนชนิดเอ็นโค้ดเดอร์แบบสัมบูรณ์ จะทำให้สามารถสร้างระบบขับเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้

6.2.2 การออกแบบตัวโครงสร้างแท่นรองรับแม่เหล็ก ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุ และรูปแบบ โครงสร้างที่สามารถรองรับน้ำหนักได้สูง มีความมั่นคงและแข็งแรง ไม่เกิดการ ยึดตัว หดตัว และเปลี่ยนรูปร่าง จะทำให้สามารถสร้างตัวแท่นรองรับแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงได้

6.2.3 การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ และบอร์ดควบคุม ตัวตรวจวัดที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง และเทคนิควิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูงได้

6.2.4 ควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของการเคลื่อนไหวอัตโนมัติของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยอาศัยองค์ความรู้ที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้



รายการอ้างอิง

- รัชชัย ทางรัตนสุวรรณ. (2545) วิศวกรรมระบบควบคุม. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2556) พลวัตระบบควบคุมและการจำลองสถานการณ์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุจินต์ บุรีรัตน์. (2556) การหาค่าเหมาะที่สุดของระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล เล่ม 1. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สรวิชาติ สุจิตจร. (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. กรุงเทพฯ : เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อิโดไชน่า.
- Abd El Ghaffar, T.S., El-Wakeel, A.S., Eliwa, A. and Mostafa, R.M. (2011). Optimal position control of permanent magnet DC motor. In **Proceeding of the 14th Aerospace Sciences & Aviation Technology** (pp. 1-9). Cairo, Egypt.
- Balewski, K. (2008). Status of PETRA III. In **Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference** (pp. 1977-1979). Genoa, Italy.
- Beltran, F., et al., (2014). Output feedback control for robust tracking of position trajectories for DC electric motors. **Electric Power Systems Research**. 2014(107) : 183–189.
- Bowden, G., Holik, P. and Wagner, S.R. (1995). Precision magnet movers for the final focus test beam. **SLAC_PUB_95-6132(1995)**. Stanford Linear Accelerator Center, USA.
- Eduardo, N., Luis, H. and Ernesto, R. (2015). Cartesian control of a 3-DOF electro-pneumatic actuated motion platform with exteroceptive pose measurement. **INTECH Open Access Publisher**. 2011(8) : 120-128.
- El-din Gamal, B., Ouda, A.N., El-Halwagy, Y.Z. and El-Nashar, G.A. (2015). Advanced fast disturbance rejection PI controller for DC motor position control. In **Proceeding of the 16th Aerospace Sciences & Aviation Technology (ASAT-16-100-CT)**. Cairo, Egypt.
- Farhan, A.S. and Albaradi, A.R. (2013). PID controllers and algorithms selection and design techniques applied in mechatronics systems design-part II. **International Journal of Engineering Sciences**. 2013(2) : 191-203.

- Friedsam, H (1993). The alignment of the Advanced Photon Source at Argonne National Laboratory. In **Proceedings of the 3rd International Workshop on Accelerator Alignment** (pp. 1-8). Annecy, France.
- Gopal, M. (2010). **Digital Control and State Variable Methods**. Singapore : McGRAW-HILL.
- Johnson, M.A. and Moradi, M.H. (2005). **PID Control new identification and design methods**. London : Springer.
- Kapelevich, A.L. and Taye, E. (2010). Self-locking gears: Design and potential applications. **Technical Resources 10FTM17**. American Gear Manufacturers Association.
- Kemppinen, J., Lackner, F. and Mainaud Durand, H. (2012). Validation test of a cam mover based micrometric pre-alignment system for future accelerator components. **Measurement Science Review**. 2012(12) : 162-157.
- Koech, W., Rotich, T., Nyamwala, F. and Rotich, S. (2016). Parameter estimation of a DC motor-gear-alternator system via step response methodology. **American Journal of Applied Mathematics**. 2016(4) : 252-257.
- Manafeddin, N. and Onur, B. (2010). DC motor position control using fuzzy proportional derivative controllers with different defuzzification methods. **Turkish Journal of Fuzzy System**. 2010(1) : 36-54.
- Mangra, D., Sharma, S. and Doose, C. (2000). Performance of the vibration damping pads in the APS storage ring. In **Proceedings of Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation**. Paul Scherrer Institute, Switzerland.
- Martin, I.P., et al., (2006). Diamond storage ring remote alignment system. In **Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference** (pp. 523-525). Edinburgh, Scotland.
- Mitsubishi Electric Corporation. (2001). **Final documents of reassembling for Siam Photon Project**. Mitsubishi Electric Corporation.
- Nayak, B. and Choudhury, T.R. (2017). Optimization of PI coefficients of permanent magnet synchronous motor drive. **Indian Journal of Science and Technology**. 2017(10) : 1-11.
- Norman, S.N. (2011). **Control System Engineering**. USA : John Wiley & Sons.
- Ogata, K. (2010). **Modern Control Engineering**. New York : PEARSON.
- Pairsuwan, W. and Ishii, T. (2001). Status of the Siam Photon Laboratory. In **Proceeding of the 2nd Asian Particle Accelerator Conference** (pp. 26-30). Beijing, China.

- Prawanta, S., Khaengkarn, S. and Srisertpol, J. (2016). Motion control of a 3-DOF girder system using eccentric circular cam. In **Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems** (pp.132-136). Tokyo, Japan.
- RAPCON Platform. www.zeltom.com
- Richard C.D. and Robert H.B. (2011). **Modern Control Systems**. New York : PEARSON.
- Roux, D (1989). Alignment & geodesy for the ESRF project. In **Proceedings of the 1st International Workshop on Accelerator Alignment** (pp. 37-72). Stanford, California.
- Roux, D (1993). The hydrostatic levelling system (HLS)/servo controlled precision jacks. A new generation atimetric alignment and control system. In **Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference** (pp. 2932-2934). Washington, USA.
- Sanguansak, N., et al. (2002). Realignment magnets of Siam Photon Source storage ring. In **Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment** (pp. 55-58). Spring-8, Japan.
- Schulze, T., Hartmann-Gerlach, C. and Schlecht, B. (2010). Calculation of load distribution in planetary gear for an effective gear design process. **Technical Resources 10FTM08**. American Gear Manufacturers Association.
- Sharma, S. (2011). Optimization of magnet stability and alignment for NSLS-II. In **Proceedings of the 2011 Particle Accelerator Conference** (pp. 2082-2086). New York, USA.
- Srichan, S., et al. (2012). Status report on storage ring realignment at SLRI. In **Proceedings of the 12th International Workshop on Accelerator Alignment**. Fermilab, USA.
- Streun, A. (2000). Algorithms for dynamic alignment of the SLS storage ring girders. **SLS-TME-TA-2000-0152**.
- Supat, K. (2009). **On-line estimation approaches to fault-tolerant control of uncertain systems**. Ph.D. dissertation, University of Hull, United Kingdom.
- Tandan, N. and Swarnkar, K.K. (2015). PID controller optimization by soft computing techniques-A review. **International Journal of Hybrid Information Technology**. 2015(8) : 357-362.
- Tippayawannakorn, N. and Pichitlamken, J. (2013). Nelder-Mead method with local selection using neighbourhood and memory for stochastic optimization. **Journal of Computer Science**. 2013(9) : 463-476.

- Tsumaki, K., et al. (2002). Magnet rearrangement for 30 m long straight sections in the SPring-8 storage ring. In **Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment** (pp. 590-603). Spring-8, Japan.
- Wanzenberg, R. (2015). Status of the recommissioning of the synchrotron light source PETRA III. In **Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference** (pp. 1485-1487). Richmond, USA.
- Wei, F.Q., Dreyer, K. and Umbricht, H (2002). Status of the SLS alignment system. In **Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment** (pp. 34-41). Spring-8, Japan.
- Wiboonjaroen, W. and Sujitjorn, S. (2013). Stabilization of a magnetic levitation control system via state-pi feedback. **International Journal of Mathematical Models and Method in Applied Sciences**. 2013(7) : 717-727.
- Willeke, F. (2015). Commissioning of NSLS-II. **BNL-107934-2015-CP**. Brookhaven National Laboratory, USA.
- Wilson, D., Martin, I. and Bell, A. (2006). Survey and alignment update from the Diamond Light Source. In **Proceeding of the 9th International Workshop on Accelerator Alignment**. Stanford Linear Accelerator Center, USA.
- Yang, S.F. and Chou, J.H. (2009). A mechatronic positioning system actuated using a micro DC-motor-driven propeller-thruster. **Mechatronics**. 2009(19) : 912-926.
- Zhang, L., Lesourd, M. and Lewis, T. (2001). Vibration damping system for magnet girder assembly at the ESRF. In **Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference** (pp. 1465-1467). Chicago, USA.
- Zelenika, S., et al., (2001). The SLS storage ring support and alignment systems. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**. 2001(467-468) : 99-102.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมคำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบขับเคลื่อนที่ 1, 2 และ 3

โปรแกรมคำนวณ Heave , Pitch และ Roll ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก

โปรแกรมคำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบข้อต่อที่ 1, 2 และ 3 โดยอ้างอิงแผนภาพ
บล็อกสมการจลนศาสตร์ผกผัน (inverse kinematics equation) ดังในรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.33

% การคำนวณตำแหน่งเชิงมุมการหมุนให้กับระบบข้อต่อที่ 1, 2 และ 3

% กำหนดอินพุตฟังก์ชันเป็น Heave, Pitch และ Roll และ

% เอาท์พุตของฟังก์ชันเป็น Alpha1, Alpha2 และ Alpha3

function [Alpha1,Alpha2,Alpha3] = fcn(Heave,Pitch,Roll)

% กำหนดค่ามุมสัมผัสระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับหน้าสัมผัสของตัวแทนรองรับแม่เหล็ก

beta1=135; % ระบบข้อต่อที่ 1 (องศา)

beta2=135; % ระบบข้อต่อที่ 2 (องศา)

beta3=45; % ระบบข้อต่อที่ 3 (องศา)

% กำหนดค่าสัญลักษณ์ที่ใช้บ่งบอกตำแหน่งการวางของลูกเบี้ยววงกลม

p1=1; % ระบบข้อต่อที่ 1

p2=1; % ระบบข้อต่อที่ 2

p3=-1; % ระบบข้อต่อที่ 3

% กำหนดค่าเอียงศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลมของระบบข้อต่อที่ 1, 2 และ 3

e=5.0;

% กำหนดค่าพิกัดตำแหน่งจุดแกนเพลลาหมุนของลูกเบี้ยววงกลมของระบบข้อต่อที่ 1, 2 และ 3

mx1=254; mx2=254; mx3=-254; % ค่าพิกัดตำแหน่งในแนวแกน x (มิลลิเมตร)

my1=-112; my2=-112; my3=-112; % ค่าพิกัดตำแหน่งในแนวแกน y (มิลลิเมตร)

mz1=-220; mz2=220; mz3=0; % ค่าพิกัดตำแหน่งในแนวแกน z (มิลลิเมตร)

% การคำนวณเอาท์พุตของฟังก์ชัน Alpha1, Alpha2 และ Alpha3 โดยอ้างอิงสมการจลนศาสตร์

% ผกผันของระบบตัวรองรับแม่เหล็ก สมการที่ (3-26)

% Alpha1 คือ ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบข้อต่อที่ 1

Alpha1=((beta1*pi/180)-Roll+(p1*(acos(cos(beta1*pi/180))*((-

Roll*my1)/e)+sin(beta1*pi/180)*((Roll*mx1-Pitch*mz1+Heave)/e))-pi))*180/pi;

% Alpha2 คือ ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบข้อต่อที่ 2

Alpha2=((beta2*pi/180)-Roll+(p2*(acos(cos(beta2*pi/180))*((-

Roll*my2)/e)+sin(beta2*pi/180)*((Roll*mx2-Pitch*mz2+Heave)/e))-pi))*180/pi;

```
% Alpha3 คือ ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบข้อต่อที่ 3
Alpha3=((beta3*pi/180)-Roll+(p3*(acos(cos(beta3*pi/180)*((-
Roll*my3)/e)+sin(beta3*pi/180)*((Roll*mx3-Pitch*mz3+Heave)/e))-pi))*180/pi;
```

```
*****
```

โปรแกรมคำนวณ Heave, Pitch และ Roll ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก โดยอ้างอิงแผนภาพ
บล็อกสมการจลนศาสตร์ (kinematics equation) ดังในรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.33

```
*****
```

```
% การคำนวณ Heave, Pitch และ Roll ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก
% กำหนดอินพุตของฟังก์ชันเป็น Alpha1, Alpha2 และ Alpha3 และ
% เอาท์พุตของฟังก์ชันเป็น Heave, Pitch และ Roll
function [Heave,Pitch,Roll] = fcn(Alpha1,Alpha2,Alpha3)
% กำหนดค่ามุมสัมพัทธ์ระหว่างลูกเบี้ยววงกลมกับหน้าสัมผัสของตัวแท่นรองรับแม่เหล็ก
beta1=135*(pi/180); % ระบบข้อต่อที่ 1 (เรเดียน)
beta2=135*(pi/180); % ระบบข้อต่อที่ 2 (เรเดียน)
beta3=45*(pi/180); % ระบบข้อต่อที่ 3 (เรเดียน)
% กำหนดค่าเอียงศูนย์กลางของลูกเบี้ยววงกลมของระบบข้อต่อที่ 1, 2 และ 3
e=5.0;
% กำหนดค่าพิกัดตำแหน่งจุดแกนพลาหมุนของลูกเบี้ยววงกลมของระบบข้อต่อที่ 1, 2 และ 3
mx1=254; mx2=254; mx3=-254; % ค่าพิกัดตำแหน่งในแนวแกน x (มิลลิเมตร)
my1=-112; my2=-112; my3=-112; % ค่าพิกัดตำแหน่งในแนวแกน y (มิลลิเมตร)
mz1=-220; mz2=220; mz3=0; % ค่าพิกัดตำแหน่งในแนวแกน z (มิลลิเมตร)
% คำนวณค่าตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของลูกเบี้ยววงกลมของระบบข้อต่อที่ 1, 2 และ 3
alpha1=Alpha1*(pi/180); (เรเดียน)
alpha2=Alpha2*(pi/180); (เรเดียน)
alpha3=Alpha3*(pi/180); (เรเดียน)
% การคำนวณค่าสัญลักษณ์ในส่วนของเมทริกซ์ M
p1=sin(beta1)*mx1-cos(beta1)*my1+e*sin(alpha1-beta1);
p2=sin(beta2)*mx2-cos(beta2)*my2+e*sin(alpha2-beta2);
p3=sin(beta3)*mx3-cos(beta3)*my3+e*sin(alpha3-beta3);
```

```

% การคำนวณค่าสัญลักษณ์ในส่วนของเมทริกซ์ q
q1=e*cos(alpha1-beta1);
q2=e*cos(alpha2-beta2);
q3=e*cos(alpha3-beta3);
% การคำนวณค่าเมทริกซ์ M
M=[sin(beta1) -sin(beta1)*mz1 p1;sin(beta2) -sin(beta2)*mz2 p2;sin(beta3) -sin(beta3)*mz3 p3];
% การคำนวณค่าเมทริกซ์ q
q=[q1;q2;q3];
% การคำนวณค่าเอาต์พุตของฟังก์ชัน Heave, Pitch และ Roll จากสมการ MT=q โดยอ้างอิงสมการ
% จลนศาสตร์ของระบบแท่นรองรับแม่เหล็ก สมการที่ (3-22)
T=inv(M)*q;
% การคำนวณค่าเอาต์พุตของฟังก์ชัน Heave, Pitch และ Roll
Heave=T(1,:);
Pitch=T(2,:);
Roll=T(3,:);

```



ภาคผนวก ข

อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการประกอบติดตั้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


QG76-SD-010H-AV-CM


Inclination sensor
2 axis horizontal mounting

Output
0,5 - 4,5 V

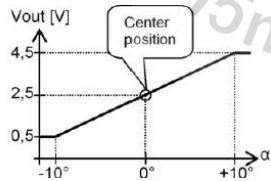
Supply voltage
8 - 30V dc

Measuring range
 $\pm 10^\circ$





QG76-SD-010H-AV-CM	General specifications v20140610
Housing	Stainless steel
Dimensions	70x60x33 mm
Mounting	4x M4x25 mm stainless steel pozidrive screws (optional: 2x Ø4 mm positioning pins)
Ingress Protection (IEC 60529)	IP67
Relative humidity	0 - 100%
Weight	ca. 700 gr
Supply voltage	8 - 30V dc
Polarity protection	Yes
Current consumption	≤ 50 mA
Operating temperature	$-40 \dots +85^\circ\text{C}$
Storage temperature	$-40 \dots +85^\circ\text{C}$
Measuring range	$\pm 10^\circ$
Centering function	Yes (2,5 V = 0°), range: $\pm 5^\circ$
Frequency response (-3dB)	10 Hz
Accuracy	overall 0,04° typ.
Offset error	$< \pm 0,02^\circ$ typ. ($< \pm 0,05^\circ$ max.) after centering
Non linearity	$< \pm 0,04^\circ$ typ. ($< \pm 0,09^\circ$ max.)
Sensitivity error	$< \pm 0,03\%$ typ. ($< \pm 0,08\%$ max.)
Resolution	0,01°
Temperature coefficient	$\pm 0,005^\circ/\text{K}$ typ.
Max mechanical shock	20.000g
Output	0,5 - 4,5 V
Output load	$R_{load} \geq 20\text{k}\Omega$, $C_{load} \leq 20$ nF
Short circuit protection	Yes (max 10 s)
Output refresh rate	20 ms

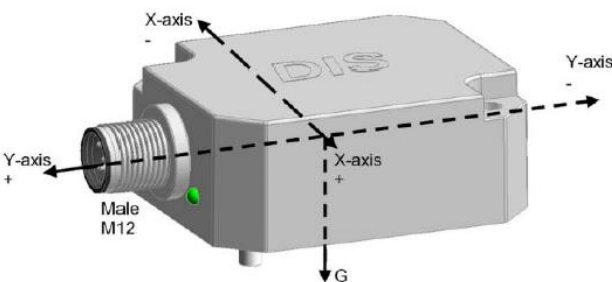


Default 0° : horizontal, no acceleration applied.

Cross tilt sensitivity error:
 $< (0,12 \cdot \text{cross tilt angle})^2 \%$ typ.

Note:
one axis $< 10^\circ$ tilt for max. accuracy


$V_{out} = 2,5 + 2 \cdot (\alpha/10) \text{ [V]}$
clipping outside measuring range



รูปที่ ข.1 ตัวตรวจรู้มุมการหมุนรอบแนวแกน x (Pitch) และแนวแกน z (Roll)

IPD-P510

Resolution / 0.5μm
Range / 10mm




FEATURES

- 8ømm, slim-body design to save space and enable flexible configuration.
- Since origin detection mechanism loaded, eliminates to readjust whenever power is turned off.
- A nut installed type is available in order to solve the problem of over-tightening the stem portion.
- In compliance with IP67 degree of protection and EC directives on CE marking.

IPD-P510N

Resolution / 0.5μm
Range / 10mm



SPECIFICATIONS

Model	IPD-P510/2M	IPD-P510/2M-03N	IPD-P510N/2M	IPD-P510N/2M-03N
Range	10mm			
Resolution	0.5μm			
Accuracy	1μm or less			
Measuring force	1.08N or less	0.3N or less	1.08N or less	0.3N or less
Response speed	2000mm/sec			
IP protection level	IP67 equivalent			
Origin position	About 2mm from the bottom			
Weight	Approx. 130g			
Cable length	2m			
Standard attachments	Contact point*1 Rubber bellows			

รูปที่ ข.2 ตัวตรวจรู้การเคลื่อนที่ในแนวแกน y (Heave)

**INCREMENTAL
SHAFT TYPE**

Outer Diameter Ø40

S40 - 6 - [] [] [] [] - [] [] - []

Resolution(P/R)	Output Signal	Output Form	Cable Length
0010 0030 0048 0050 0060	B : A, B	O : Open Collector	1 : 1[M]
0072 0075 0100 0120 0125	Z : A, B, Z	V : Voltage Output	2 : 2[M]
0192 0200 0250 0256 0300	U : A, \bar{A} , B, \bar{B}	C : Complemental	3 : 3[M]
0360 0400 0500 0512 0600	V : A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z}	T : Totem Pole	4 : 5[M]
0720 1000 1024 1200 2000		L : Line Driver	5 : 10[M]
2048 2500 3000 3600			

3-M3 Tap Dep.5
3-120° PCD 28

Ø40±0.1
Ø37
Ø20^{+0.03}/_{-0.02}
Ø6^{+0.0}/_{-0.02}
10
2
N.P.
1.5
1.5

รูปที่ ข.3 ตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุมการหมุนของระบบจับเร้า

63JW/63ZY125 永磁直流 蜗轮减速电机

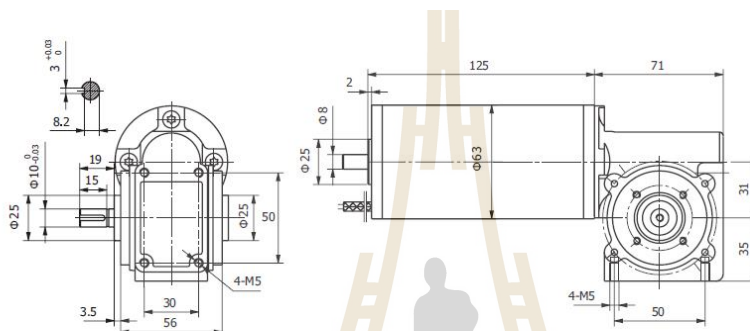
PM DC WORM GEAR MOTOR

产品特点 and 用途

1. 新产品，适合减速器输出轴与电机成90°的使用场合。
2. 可以制造12VDC的产品，电动机转速根据需要可以调整。
3. 电动机可以带编码器，可以后引出线。



外形和安装尺寸 Dimensions



电动机主要技术参数 Motor Technical Data

电机型号 Type	额定电压 Rated voltage (VDC)	空载转速 No-load speed (r/min)	空载电流 No-load current (A)	额定转速 Rated speed (r/min)	额定转矩 Rated torque (N.m)	输出功率 Output power (W)	额定电流 Rated current (A)	堵转转矩 Stall torque (N.m)	堵转电流 Stall current (A)
63ZY125-2430	24	3000	0.5	2600	0.25	70	4.6	1.1	20
63ZY125-3633	36	3300	0.5	2700	0.34	100	4.0	1.6	16

齿轮减速电机主要技术参数 Gear motor Technical Data

配置63ZY125-2430电机的完整型号：63JW□G10/63ZY125-2430（出轴直径10mm，□内填写减速比）

减 速 比	Reduction ratio	30	15	10
蜗杆头数	Number of threads	1	2	3
空载转速	No-load speed r/min	100	200	300
额定转速	Rated speed r/min	87	173	260
额定转矩	Rated torque N.m	5.2	3.0	2.1

配置63ZY125-3633电机的完整型号：63JW□G10/63ZY125-3633（出轴直径10mm，□内填写减速比）

减 速 比	Reduction ratio	30	15	10
蜗杆头数	Number of threads	1	2	3
空载转速	No-load speed r/min	110	220	300
额定转速	Rated speed r/min	90	180	270
额定转矩	Rated torque N.m	7.1	4.0	2.9

รูปที่ ข.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรและชุดเฟืองตัวหนอน

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a crown-like top. The entire logo is rendered in a light beige color.

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Supachai Prawanta, Sorada Khaengkarn and Jiraphon Srisertpol (2016). Motion control of a 3-DOF girder system using eccentric circular cam. In **Proceedings of IEEE Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems** (pp. 132-136). Tokyo, Japan.

Soontaree Saengsri, Supachai Prawanta, Soontorn Odngam and Jiraphon Srisertpol (2017). PI-servo with state-D feedback and observer for magnetic stirrer machine. In **Proceedings of International Conference on Circuits, Devices and Systems** (pp. 6-10). Chengdu, China.



ประวัติผู้เขียน

นายสุกษัย ประวันตา เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2517 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเวียงน้อยศึกษา จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2540 ได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้าแรงสูง ไฟฟ้ากำลัง และเข้าทำงานที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตำแหน่งวิศวกรฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค ได้รับทุนโครงการพัฒนานุเคราะห์ และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้สอนรายวิชาปฏิบัติการและงานวิจัยทางด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม และพัฒนาชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่อัตโนมัติสามแกน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เมื่อปี พ.ศ. 2551 กลับเข้าทำงานที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และปฏิบัติงานในตำแหน่งหัวหน้าส่วนงานเดินเครื่องและซ่อมบำรุงฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค ได้รับทุนรัฐบาลที่จัดสรรให้กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อศึกษาวิชาในประเทศ ประจำปี พ.ศ. 2556 ตามความต้องการของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ไปศึกษาในสาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ เน้น ระบบควบคุมและอัตโนมัติ ในระดับปริญญาเอก และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้สอนรายวิชาปฏิบัติการและงานวิจัยทางด้านการออกแบบและสร้างระบบแท่นรองรับแม่เหล็กที่สามารถเคลื่อนไหวอัตโนมัติได้ 3 องศาอิสระ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับตั้งแม่เหล็กและท่อลำเลียงอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนให้อยู่ในระดับและตำแหน่งที่ถูกต้องได้ การดำเนินงานวิจัยดังกล่าวให้ผลสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ อีกทั้ง ไปนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ IEEE ACIRS 2016 ณ เมืองโคเกียว ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างวันที่ 20-24 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 และไปทำวิจัยระยะสั้นที่ Nagaoka University of Technology ณ เมืองนงะโอะกะ ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 ถึง วันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2560